



**Vitor Daniel
Ramisote Santos**

**Avaliação do comportamento de asnas antigas de
madeira de grande vão**



**Vitor Daniel
Ramisote Santos**

**Avaliação do comportamento de asnas antigas de
madeira de grande vão**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica do Dr. Humberto Salazar Amorim Varum, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro e do Dr. Jorge Manuel Gonçalves Branco, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho.

o júri

presidente

Prof. Dr. Paulo Barreto Cachim
Professor associado da Universidade de Aveiro

Prof. Dr. João Paulo Sousa Costa de Miranda Guedes
Professor auxiliar da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Prof. Dr. Humberto Salazar Amorim Varum
Professor auxiliar da Universidade de Aveiro

Prof. Dr. Jorge Manuel Gonçalves Branco
Professor auxiliar da Universidade do Minho

agradecimentos

Várias pessoas contribuíram para que este trabalho chegasse a bom porto, e todas as palavras serão insuficientes para lhes poder agradecer convenientemente.

Gostaria de agradecer ao Professor Dr. Humberto Varum, por toda a paciência, disponibilidade, amizade e sobretudo por ter compartilhado todo o conhecimento e experiência que foram indispensáveis para a realização deste trabalho.

De igual modo gostaria de agradecer também ao Professor Dr. Jorge Branco, pela orientação, material fornecido, disponibilidade e amizade pois sem a sua ajuda seria impossível terminar este trabalho.

Ao Professor Dr. Aníbal Costa, Professor Dr. António Arêde, Sr. Valdemar, André e ao resto do pessoal do LESE da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, por toda ajuda e tempo dispendido para que o ensaio pudesse ter o sucesso que teve.

À Eng. Elsa Neto, Eng. Maria Carlos e ao Sr. Raul Barros, pela companhia e ajuda prestada no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.

Ao Sr. Mário Fernando Reis, por todo o bom trabalho de carpintaria desenvolvido, sem o qual seria impossível concluir todo o trabalho prático.

À BAUCOM – Materiais de Construção e à BLOCOTELHA, por todo o material gentilmente cedido, pois sem o qual seria impossível efectuar o ensaio com segurança.

Aos meus colegas, Bruno Ribeiro, David M.C., Guilherme Carlos, José Melo, Licínio Índio, Luís Rodrigues, Miguel Costa, Nilsa e Zé por toda a ajuda prestada a todos os níveis, quer físico quer psicológico, mas sobretudo pela amizade.

Quero agradecer também à minha mãe, irmã, cunhado e namorada por toda a paciência e apoio durante todos os altos e baixos deste trabalho.

Por fim gostaria de deixar um agradecimento especial ao meu pai, por ter estado presente em toda a fase prática do trabalho e por me ter ajudado sempre que lhe foi possível.

A todos eles o meu sincero obrigado!

palavras-chave

Asnas de madeira, diagnóstico, comportamento estrutural, ensaio de carga

resumo

Em Portugal, a maioria das edificações antigas possuem asnas de madeira como elemento de suporte das suas coberturas. Com o avançar do tempo, é normal que a madeira constituinte dos elementos da cobertura comece a perder algumas das suas propriedades resistentes, não sendo no entanto necessária a sua completa substituição.

Procura-se com este trabalho aumentar o conhecimento relativo ao comportamento de asnas antigas de madeira fornecendo dados que auxiliem Projectistas e Engenheiros na definição do tipo de intervenção necessária.

Para efectuar este estudo, realizou-se um ensaio de carga cíclico no qual se levou uma asna antiga de madeira à rotura. Depois de tratados e analisados os dados do ensaio, estes foram reproduzidos através de um modelo numérico, com vista a ter uma resposta concreta acerca das zonas mais frágeis de uma asna, tendo assim a resposta acerca da localização das zonas a reforçar.

Com o presente trabalho, torna-se mais fácil e expedita a escolha de um tipo de reforço efectivo e eficaz, que consiga aumentar a longevidade das coberturas das edificações antigas portuguesas.

keywords

Timber Truss, diagnosis, structural behavior, load-carrying test

abstract

In Portugal, most of the old constructions have traditional timber trusses as support element of the roof structure.

With the advancing of time, it is normal that the timber elements of the roof structure begin to lose some of their resistant properties, however it is not necessary the complete substitution of the entire roof structure.

It is tried with this work, to increase the knowledge about the behavior of the old timber trusses, in order to supply important data to Designers and Engineers in the definition of the proper reinforcement intervention type to use.

To do this study, a cyclical load test was carried out, where the timber truss was taken to failure. The results of the load test were analysed carefully and were reproduced through a numerical model in order to have a sharp answer about the truss behaviour and to know the exact location of the crucial zones of the truss to reinforce.

With the present work, it becomes easier to make the choice of the type of an effective and efficient reinforcement to use, which manages to increase the longevity of the roof structures of the old Portuguese constructions.

ÍNDICE DE TEXTO

Índice de Texto	i
Índice de Figuras	v
Índice de Tabelas	ix
Índice de Gráficos	xi
Lista de Símbolos	xiii
CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Preâmbulo	1
1.2. Objectivos	1
1.3. Motivação	2
1.4. Estratégia	2
1.5. Estrutura da tese	2
CAPÍTULO 2. ASNAS DE MADEIRA	5
2.1. Evolução Histórica	6
2.2. Geometrias comuns das asnas de madeira	8
2.2.1. Asna simples e variantes	8
2.2.2. Asna composta	10
2.2.3. Asna em tesoura	10
2.2.4. Asna de Mansarda	11
2.2.5. Asna com lanternim	12
2.2.6. Outras Geometrias	12
2.3. Comportamento estrutural das asnas simples	13
2.4. Ligações	14
2.4.1. Ligações tradicionais	15
2.4.2. Ligadores Metálicos	16
2.4.3. Exigências e princípios gerais das ligações	19
2.5. Anomalias mais comuns	20
2.6. Técnicas de reforço mais comuns	23

CAPÍTULO 3.	DIMENSIONAMENTO E VERIFICAÇÕES DE SEGURANÇA: EC-5 PARTE 1-1....	27
3.1.	Bases de cálculo	28
3.1.1.	Classes de serviço	28
3.1.2.	Classes de Duração das Cargas	28
3.2.	Valores de Cálculo das Propriedades Mecânicas da Madeira.....	29
3.3.	Valores de Cálculo dos Efeitos das Acções.....	29
3.4.	Verificações de segurança ao nível dos elementos da Asna.....	30
3.4.1.	Compressão (paralela ao fio)	30
3.4.2.	Tracção (paralela ao fio)	30
3.4.3.	Flexão simples	31
3.4.4.	Flexão combinada com tracção	31
3.4.5.	Flexão combinada com compressão	32
3.5.	Verificação ao nível das ligações da Asna	34
3.5.1.	Verificação ao Esmagamento.....	35
3.5.2.	Verificação ao Corte paralelo ao fio	36
CAPÍTULO 4.	AVALIAÇÃO DA ASNA COMPOSTA	37
4.1.	Inspecção Visual.....	38
4.2.	Avaliação Geométrica	40
CAPÍTULO 5.	Ensaaios não destrutivos (NDT)	43
5.1.	Teor de água	43
5.2.	Pilodyn ®	45
5.3.	Resistograph ®	47
CAPÍTULO 6.	PREPARAÇÃO DO ENSAIO	51
6.1.	Esquemas e Reparações	51
6.2.	Sistema de contraventamento	53
6.3.	Sistema de actuação	55
CAPÍTULO 7.	ENSAIO DE CARGA	59
7.1.	Procedimento de carga	59
7.2.	Instrumentação.....	61

7.3.	Resultados do Ensaio	63
7.3.1.	Comportamento da estrutura	63
7.3.2.	Evolução dos danos	70
7.3.3.	Antes e Após	73
CAPÍTULO 8.	MODELAÇÃO NUMÉRICA.....	77
8.1.	Modelação da asna	77
8.2.	Efeito da Rigidez das Ligações	78
8.3.	Modelação das ligações	81
8.4.	Calibração do Modelo	84
8.5.	Cálculo da força máxima	87
8.5.1.	Verificação da ligação Linha-Perna	88
8.5.2.	Verificação da resistência da Linha da asna	89
8.5.3.	Verificação da resistência da Perna da asna	90
8.6.	Sugestões de Reforço	91
CAPÍTULO 9.	Conclusões e Recomendações	93
	Referências Bibliográficas	95
ANEXO A.	Corte da asna	99
ANEXO B.	Resultados do Resistograph®	101

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Elementos de uma cobertura tradicional portuguesa em madeira [2]	5
Figura 2 Elementos de uma asna de madeira.....	6
Figura 3 Asna pré-histórica [3]	6
Figura 4 Diferentes tipos de asnas consoante a geografia [4].....	7
Figura 5 Diferentes geometrias de asnas simples [4]	8
Figura 6 Asna de Palladio.....	9
Figura 7 Asna composta [6]	10
Figura 8 Asna em tesoura	11
Figura 9 Asna de mansarda.....	11
Figura 10 Asna com lanternim [7]	12
Figura 11 Geometrias de asnas, [5,8,9].....	13
Figura 12 Ligações tradicionais de dente [4]	15
Figura 13 Pormenores de encaixe com recurso a mecha e respiga [4, 11].....	15
Figura 14 Ligadores correntes: (a) pregos; (b) agrafos; (c) parafuso de porca e anilhas; (d) parafuso de enroscar; (e) cavilha; (f) anel; (g) placas denteadas; (h) chapa metálica denteada; (i) placa circular com rebordo [12]	17
Figura 15 Chapas enformadas a frio [12]	17
Figura 16 Elementos de ligações metálicos [13].....	18
Figura 17 Asna de madeira com ligações metálicas.....	18
Figura 18 Anomalias de origem biológica [18, 19].....	22
Figura 19 Excentricidade das madres em relação ao nó [10].....	23
Figura 20 Aplicação do método adesivo (resinas epoxy) [5]	24
Figura 21 Reforço mecânico com elementos metálicos [21]	24
Figura 22 Esforços na ligação Linha-Perna	35
Figura 23 Asna em estudo	37
Figura 24 Geometria da asna e nomenclatura utilizada	37
Figura 25 Acção do caruncho na zona periférica dos elementos	38
Figura 26 Estado da ligação Perna-Pendural	39
Figura 27 Mapeamento das anomalias encontradas.....	40

Figura 28 Diferença de secção (meio-topo).....	41
Figura 29 Ligações tradicionais	42
Figura 30 Ligações com elementos metálicos	42
Figura 31 Humidímetro electrónico	44
Figura 32 Modo de utilização do humidímetro electrónico	44
Figura 33 Pilodyn®	46
Figura 34 Mapeamento da profundidade de penetração do Pilodyn®.....	47
Figura 35 Resistograph®	48
Figura 36 Secção avaliada e resultado do ensaio do Resistograph®.....	49
Figura 37 Reparação da ligação Perna esquerda – Pendural	52
Figura 38 Reparação de ligações.....	52
Figura 39 Calços para aplicação da carga	53
Figura 40 Sistema de contraventamento utilizado	54
Figura 41 Aspecto final da estrutura contraventada	54
Figura 42 Macacos hidráulicos fixos na laje.....	55
Figura 43 Sistema de ligação correntes-macaco.....	56
Figura 44 Excentricidade das cargas.....	59
Figura 45 Carregamento Sem excentricidade vs Com excentricidade.....	60
Figura 46 Esquema de toda a instrumentação utilizada	61
Figura 47 Potenciómetro de Fio.....	62
Figura 48 LVDT's da ligação Linha-Perna	62
Figura 49 Anomalia fenda anelar [24]	67
Figura 50 Ligação Linha-Perna pós rotura	68
Figura 51 Esmagamento na ligação Linha-Perna Esquerda	70
Figura 52 Evolução do esmagamento das ligações Linha-Perna	71
Figura 53 Separação e deslize das fibras	71
Figura 54 Rotura devido ao esforço de corte	72
Figura 55 Separação da ligação Linha-Escora	72
Figura 56 Inclinação de elementos verticais e deslocamento de elementos.....	73
Figura 57 Asna modelada com secções diferenciadas	78
Figura 58 Ligações Modeladas	79
Figura 59 Esquema para o cálculo da rigidez axial [30].....	82

Figura 60 Função para o comportamento não-linear (<i>Takeda</i>) [29]	84
Figura 61 Esforços na ligação Linha-Perna	88
Figura 62 Reforço com recurso ao varão roscado [4]	92
Figura 63 Reforço com recurso a chapas ligadas por varões roscados.....	92
Figura A1 Secção avaliada pelo Resistograph®	99
Figura A2 Encurvadura lateral da Linha da asna.....	100
Figura B1 Secção avaliada e mapeamento do ensaio efectuado (R1)	101
Figura B2 Resultado extraído directamente do Resistograph® (R1).....	101
Figura B3 Secção avaliada e mapeamento do ensaio efectuado (R2)	101
Figura B4 Resultado extraído directamente do Resistograph® (R2).....	102
Figura B5 Secção avaliada e mapeamento do ensaio efectuado (R3)	103
Figura B6 Resultado extraído directamente do Resistograph® (R3).....	103
Figura B7 Secção avaliada e mapeamento do ensaio efectuado (R4)	104
Figura B8 Resultado extraído directamente do Resistograph® (R4).....	104
Figura B9 Secção avaliada e mapeamento do ensaio efectuado (R6)	105
Figura B10 Resultado extraído directamente do Resistograph® (R6).....	105
Figura B11 Secção avaliada e mapeamento do ensaio efectuado (R7)	106
Figura B12 Resultado extraído directamente do Resistograph® (R7).....	106
Figura B13 Secção avaliada e mapeamento do ensaio efectuado (R10)	107
Figura B14 Resultado extraído directamente do Resistograph® (R10).....	107
Figura B15 Secção avaliada e mapeamento do ensaio efectuado (R12)	108
Figura B16 Resultado extraído directamente do Resistograph® (R12).....	108
Figura B17 Secção avaliada e mapeamento do ensaio efectuado (R14)	109
Figura B18 Resultado extraído directamente do Resistograph® (R14).....	109
Figura B19 Secção avaliada e mapeamento do ensaio efectuado (R15)	110
Figura B20 Resultado extraído directamente do Resistograph® (R15).....	110
Figura B21 Secção avaliada e mapeamento do ensaio efectuado (R16)	111
Figura B22 Resultado extraído directamente do Resistograph® (R16).....	111
Figura B23 Secção avaliada e mapeamento do ensaio efectuado (R18)	112
Figura B24 Resultado extraído directamente do Resistograph® (R18).....	112
Figura B25 Secção avaliada e mapeamento do ensaio efectuado (R21)	113

Figura B26 Resultado extraído directamente do Resistograph® (R21)	113
Figura B27 Secção avaliada e mapeamento do ensaio efectuado (R22)	114
Figura B28 Resultado extraído directamente do Resistograph® (R22).....	114
Figura B29 Secção avaliada e mapeamento do ensaio efectuado (R25)	115
Figura B30 Resultado extraído directamente do Resistograph® (R25).....	115
Figura B31 Secção avaliada e mapeamento do ensaio efectuado (R26)	116
Figura B32 Resultado extraído directamente do Resistograph® (R26).....	116
Figura B33 Mapeamento do ensaio efectuado (R5)	117
Figura B34 Resultado extraído directamente do Resistograph® (R5).....	117
Figura B35 Mapeamento do ensaio efectuado (R8)	117
Figura B36 Resultado extraído directamente do Resistograph® (R8).....	117
Figura B37 Mapeamento do ensaio efectuado (R9)	118
Figura B38 Resultado extraído directamente do Resistograph® (R9).....	118
Figura B39 Mapeamento do ensaio efectuado (R11)	118
Figura B40 Resultado extraído directamente do Resistograph® (R11).....	118
Figura B41 Mapeamento do ensaio efectuado (R13)	119
Figura B42 Resultado extraído directamente do Resistograph® (R13).....	119
Figura B43 Mapeamento do ensaio efectuado (R17)	119
Figura B44 Resultado extraído directamente do Resistograph® (R17).....	119
Figura B45 Mapeamento do ensaio efectuado (R19)	120
Figura B46 Resultado extraído directamente do Resistograph® (R19).....	120
Figura B47 Mapeamento do ensaio efectuado (R20)	120
Figura B48 Resultado extraído directamente do Resistograph® (R20).....	120
Figura B49 Mapeamento do ensaio efectuado (R23)	121
Figura B50 Resultado extraído directamente do Resistograph® (R23).....	121
Figura B51 Mapeamento do ensaio efectuado (R24)	121
Figura B52 Resultado extraído directamente do Resistograph® (R24).....	121

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 Coeficientes parciais de segurança dos materiais [1]	27
Tabela 2 Coeficientes parciais de segurança das acções [22]	27
Tabela 3 Classes de duração das acções [1]	29
Tabela 4 Características de durabilidade natural da madeira de Pinho Bravo [23]	39
Tabela 5 Secções dos elementos	41
Tabela 6 Resultados do humidímetro	45
Tabela 7 Resultados Pilodyn®	47
Tabela 8 Dimensões dos prumos utilizados	54
Tabela 9 Especificações das peças do sistema de actuação.....	57
Tabela 10 Deslocamentos máximos medidos nos transdutores	69
Tabela 11 Antes e após o ensaio de carga.....	74
Tabela 12 Propriedade Mecânicas do Pinho Bravo [23]	77
Tabela 13 Valores de rigidez teórica para cada NNLINK	83
Tabela 14 Resultados experimentais (Ensaio) vs numéricos (Mod.) [cm]	86
Tabela 15 Valores de rigidez (axial) após calibração.....	87

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1 Procedimento de carga	60
Gráfico 2 Relação Força-Deslocamento (LF 15)	63
Gráfico 3 Força-deslocamento LF7 e LF8.....	64
Gráfico 4 Força-deslocamento LF2 e LF4.....	64
Gráfico 5 Deslocamentos relativos Linha-Pendural	65
Gráfico 6 Rotação relativa, Linha-Perna esquerda	65
Gráfico 7 Deslocamento horizontal da asna.....	66
Gráfico 8 Deslocamentos relativos das ligações Pernas-Linha.....	66
Gráfico 9 Sistema Real vs Reticulado vs Rígido.....	80
Gráfico 10 Comportamento da ligação Linha-Pendural.....	80
Gráfico 11 Comportamento não linear real (LVDT 7) vs modelação (NNLINK 14)	84
Gráfico 12 Rigidez teórica vs Ensaio de carga (LF 7 e LF 15)	85

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Secção da peça
$A_{\text{peça metálica}}$	Secção da peça metálica
b	Largura do elemento
$E_{0,05}$	Valor do quinto percentil do módulo de elasticidade paralelo às fibras
$E_{\text{peça metálica}}$	Módulo de elasticidade da peça metálica
E_{α}	Valor do módulo de elasticidade com um ângulo “ α ” com as fibras
F_d	Valor de cálculo da força
F_k	Valor característico da força
$f_{c,0,d}$	Valor de cálculo da tensão de compressão resistente, paralelamente às fibras
$f_{c,90,d}$	Valor de cálculo da tensão resistente de compressão, perpendicular às fibras
$f_{c,90,k}$	Valor característico da tensão de compressão, perpendicular às fibras
$f_{m,d}$	Valor de cálculo da tensão resistente devido à flexão
$f_{m,y,d}$	Valor de cálculo da tensão resistente devido à flexão, segundo o eixo yy
$f_{m,z,d}$	Valor de cálculo da tensão resistente devido à flexão, segundo o eixo zz
F_t	Força de tracção
$f_{t,0,d}$	Valor de cálculo da tensão de tracção resistente, paralelamente às fibras
$f_{t,0,k}$	Valor característico da tensão de tracção resistente, paralelamente às fibras
$f_{v,d}$	Valor de cálculo da tensão resistente de corte
$f_{v,k}$	Valor característico da tensão resistente de corte
h	Altura da peça
I	Momento de Inércia
K_{crit}	Factor de redução devido à encurvadura lateral
K_h	Factor de escala
K_m	Factor que tem em conta a redistribuição das tensões e o efeitos da heterogeneidade do material numa determinada secção

K_{mod}	Factor de modificação que tem em conta o efeito da duração da carga e do teor de humidade, nos valor resistentes.
$K_{\alpha x}$	Valor da rigidez de uma ligação com um ângulo “ α ”
$K_{\alpha x, pm}$	Valor da rigidez de uma ligação com recurso a uma peça metálica com um ângulo “ α ”
l	Profundidade do entalhe
l_{ef}	Comprimento efectivo do elemento
l_v	Distância do bordo do elemento ao topo do entalhe da ligação
$L_{peça\ metálica}$	Comprimento da peça metálica
M	Momento flector
M_y	Momento flector segundo o eixo yy
N	Esforço axial
S	Secção teórica da ligação, através da qual se considera o esforço transmitido
t_v	Profundidade do entalhe
X_d	Valor de cálculo da propriedade
l	Posição do centróide da peça
X_k	Valor característico da propriedade
α	Ângulo do dente da ligação
β	Ângulo formado por dois elementos ligados entre si
$\sigma_{c,0,d}$	Valor de cálculo da tensão de compressão aplicada paralelamente às fibras
$\sigma_{c,\alpha,d}$	Valor de cálculo da tensão de compressão aplicada com um ângulo “ α ” em relação às fibras
$\sigma_{m,crit}$	Valor crítico da tensão devido à flexão
$\sigma_{m,d}$	Valor de cálculo da tensão actuante devido à flexão
$\sigma_{m,y,d}$	Valor de cálculo da tensão actuante devido à flexão, segundo o eixo yy
$\sigma_{m,z,d}$	Valor de cálculo da tensão actuante devido à flexão, segundo o eixo zz
$\sigma_{t,0,d}$	Valor de cálculo da tensão de tracção aplicada paralelamente às fibras
$\tau_{v,d}$	Valor de cálculo da tensão de corte

λ_z e $\lambda_{rel,z}$	Esbeltezas correspondentes à flexão segundo o eixo yy (deformada segundo zz)
λ_y e $\lambda_{rel,y}$	Esbeltezas correspondentes à flexão segundo o eixo zz (deformada segundo yy)
$\lambda_{rel,m}$	Esbelteza relativa
γ_F	Coeficiente parcial de segurança da força
γ_M	Coeficiente parcial de segurança do material

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO

1.1. PREÂMBULO

A madeira, desde sempre fez parte da vida do homem, ora como agradáveis sombras ainda na forma de árvores, ora como utensílio para a obtenção de fogo, ou ainda como material base das primeiras construções do homem pré-histórico quando este abandonou as cavernas.

Nas obras de construção civil, a madeira incorporou-se como um dos materiais mais utilizados nas estruturas provisórias e definitivas de uma construção, pois era um material bastante fácil de trabalhar e obter.

Com o avançar dos anos e com o aparecimento de novos materiais, tais como o aço e o betão, a madeira tem vindo a ser preterida, uma vez que os outros materiais não exigem uma mão-de-obra tão qualificada e são produzidos em quantidade e a preços mais reduzidos.

Contudo, e apesar da sua escassez actual, comparando as secções transversais agora disponíveis com as existentes há séculos, tem-se vindo a assistir a um reavivamento do uso de estruturas de madeira, nomeadamente ao nível das coberturas, onde as asnas de madeira têm um papel preponderante. Este novo fulgor da construção em madeira deve-se não só às suas boas capacidades estruturais, mas também devido ao seu elevado sentido estético.

1.2. OBJECTIVOS

Esta tese tem como principais objectivos:

- Uma revisão bibliográfica apresentando o estado do conhecimento referente às coberturas tradicionais em madeira;
- Apresentar uma metodologia de inspecção e avaliação do comportamento de asnas de madeira antigas;
- Realização de um ensaio de carga cíclico sobre uma asna de madeira antiga recuperada de uma cobertura industrial;
- Modelação numérica do ensaio de carga;

- Avaliar diferentes possibilidades de reforço da asna após a rotura atingida no ensaio de carga.

1.3. MOTIVAÇÃO

Quando as asnas de madeira apresentam sinais de degradação, muitas vezes independentemente do seu estado de evolução da degradação, é prática comum substituí-las integralmente por estruturas novas. Procura-se com esta dissertação aumentar o conhecimento relativo ao comportamento de asnas antigas de madeira fornecendo dados que auxiliem Projectistas e Engenheiros na definição do tipo de intervenção mais adequada. O senso comum demonstra que há várias alternativas à substituição total da estrutura de madeira, que têm a vantagem adicional, de promoverem a preservação e conservação do património construído, seja ele histórico ou não.

1.4. ESTRATÉGIA

Ao longo deste trabalho, proceder-se-á ao estudo do comportamento estrutural de asnas tradicionais de madeira. Realizar-se-á um ensaio de carga cíclico aplicado numa asna de madeira salva de uma operação de demolição de uma das coberturas da empresa ADICO, em Avanca. Por fim, o ensaio será reproduzido através de um modelo numérico, o que permitirá uma melhor compreensão do comportamento global e local da asna em estudo.

1.5. ESTRUTURA DA TESE

A tese que se segue encontra-se subdividida em 9 capítulos.

No primeiro capítulo é apresentada uma pequena introdução à dissertação, e são apresentadas a motivação e a estratégia usadas, bem como os objectivos principais do trabalho realizado.

No capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica da temática das asnas tradicionais de madeira, sendo mencionada a sua evolução histórica, diversas

geometrias, tipos de ligação, entre outros aspectos importantes à análise do seu comportamento estrutural.

No capítulo 3 analisam-se as metodologias de dimensionamento e verificação da segurança para as ligações e elementos constituintes de asnas de madeira, de acordo com o Eurocódigo 5 : Parte 1-1 [1].

No capítulo 4 resumem-se os principais passos e conclusões da inspecção visual e avaliação geométrica da asna de madeira realizadas já em laboratório, previamente ao ensaio de carga.

No capítulo 5 são apresentados todos os ensaios não-destrutivos efectuados na asna nomeadamente, o ensaio de humidímetro, Pilodyn® e Resistograph®.

O capítulo 6 é dedicado à descrição de todo o trabalho de laboratório realizado e de todo o processo de preparação do ensaio, incluindo consolidação da asna, travamento do sistema de ensaio e montagem do esquema de ensaio.

No capítulo 7 é descrita toda a campanha de ensaio realizada no laboratório de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, sendo apresentados e analisados todos os resultados provenientes do ensaio.

O capítulo 8 dedica-se à modelação numérica do ensaio de carga realizado na asna de madeira em estudo.

Finalmente, no capítulo 9 são apresentadas as principais conclusões da dissertação e são sugeridos alguns desenvolvimentos futuros.

CAPÍTULO 2. ASNAS DE MADEIRA

Em Portugal, a construção em madeira foi sempre bastante utilizada na execução tanto de coberturas, como para a construção de pisos e paredes. Com o aparecimento do betão armado, as paredes e os pisos em madeira perderam a sua importância ao contrário das coberturas em madeira que permaneceram frequentes.

As coberturas com asnas em madeira mais utilizadas em Portugal, apresentam pendentes entre os 20° a 30° seguindo uma geometria simples. Este tipo de cobertura é também constituído por outros elementos sendo estes, as madres, varas e ripas, que assentam sobre as asnas (Figura 1).

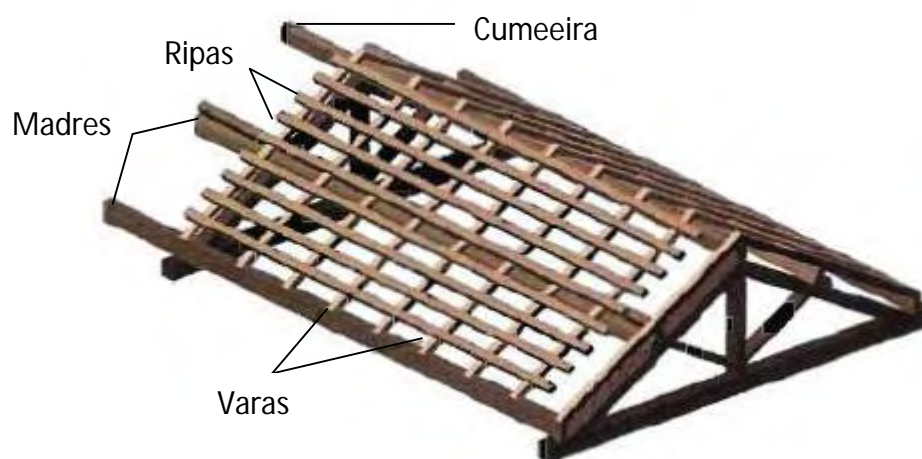


Figura 1 Elementos de uma cobertura tradicional portuguesa em madeira [2]

Referindo somente as asnas tradicionais portuguesas, estas são constituídas por um elemento horizontal denominado por Linha, um elemento vertical denominado por Pendural, por duas Pernas inclinadas que conferem a pendente da cobertura e também por duas Escoras que fazem a ligação entre as Pernas e o Pendural (Figura 2).

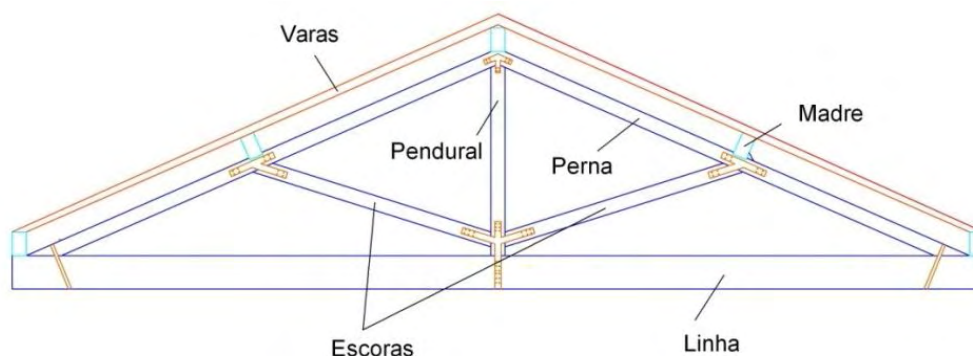


Figura 2 Elementos de uma asna de madeira

2.1. EVOLUÇÃO HISTÓRICA

As asnas de madeira, desde a antiguidade que constituem um sistema estrutural frequente com significativa importância no progresso e evolução das construções em madeira. Já o homem pré-histórico utilizava ramos de árvore enterrados no solo, flectidos e amarrados no topo ficando com uma forma aproximadamente de uma cúpula que servia de protecção contra os animais e as intempéries (Figura 3).

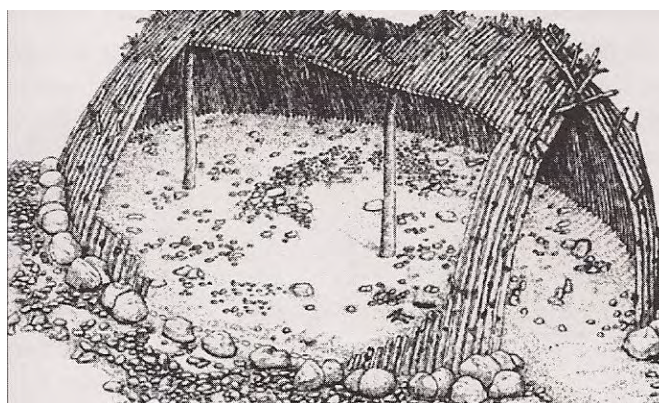


Figura 3 Asna pré-histórica [3]

Há factos que mostram, que na Grécia antiga também já existiam coberturas com recurso a elementos robustos em madeira com um funcionamento similar aos de asnas, sendo que esses elementos não funcionariam como asnas em si, mas sim como vigas simplesmente apoiadas [4].

As asnas de madeira como as conhecemos nos dias de hoje, tiveram a sua base de inspiração, nas igrejas Cristãs construídas pelos Romanos no séc. IV, onde já eram utilizadas asnas simples com recurso a um elemento vertical (Pendural) [4].

Nos inícios do período da Renascença, início do séc. XV, Mariano di Jacopo desenhou várias configurações de asnas. Entre estas encontravam-se a asna simples, em

que o Pendural estava directamente ligado à Linha da asna e outras configurações em que não existia sequer Linha da asna, ou ainda configurações mistas em que se conjugavam elementos em madeira e elementos metálicos [4].

Em meados do séc. XVI, Giovan Battista Da Sangallo projectou vários tipos de asna um pouco diferentes, estas asnas eram constituídas por 3 elementos verticais (Pendurais), e a Linha da asna não se encontrava directamente ligada a nenhum destes Pendurais. Entretanto Andrea Palladio apresentou também várias configurações possíveis, onde, ao contrário das asnas de Sangallo, o Pendural se encontrava directamente ligado à Linha da asna. Este esquema de asna de Palladio é uma das configurações mais utilizadas em Portugal para vãos de dimensões não muito grandes (nunca superior a 7 metros).

As configurações das asnas variam de região para região, por exemplo, enquanto nas regiões mediterrânicas são usadas estruturas mais simples e de inclinações mais suaves, nas regiões do centro e do norte da Europa são utilizados esquemas mais complexos e com inclinações mais abruptas, estes últimos esquemas seguem um estilo Gótico (Figura 4) [4].

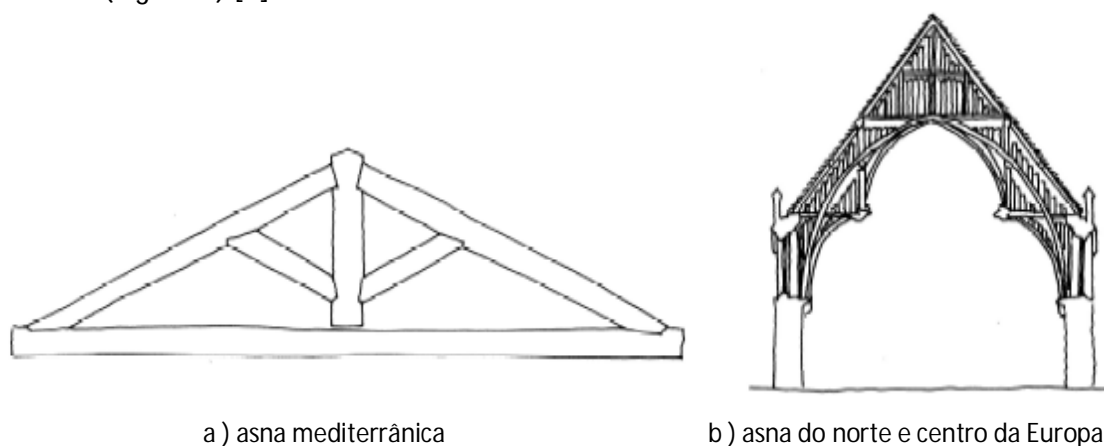


Figura 4 Diferentes tipos de asnas consoante a geografia [4]

Depois do séc. XIX, as asnas sofreram uma revolução no que toca ao seu comportamento estrutural, pois até então as asnas de madeira comportavam-se como vigas simplesmente apoiadas ou como um sistema reticular. Estas configurações faziam com que a componente da flexão fosse elevada, sobretudo ao nível da Linha.

Somente depois deste período é que as asnas foram realizadas de maneira a que os esforços axiais de compressão e de tracção fossem os principais esforços em todos os

seus elementos. Isto foi conseguido através da separação do Pendural da Linha da asna ou seja através da configuração de arco de três rótulas [4].

2.2. GEOMETRIAS COMUNS DAS ASNAS DE MADEIRA

Como já foi referido anteriormente, as asnas de madeira podem ter diversas geometrias, estas dependem do vão que se quer utilizar e também dos esforços a que esta irá ser sujeita.

As geometrias que se usam com mais frequência em Portugal são mencionadas a seguir.

2.2.1. Asna simples e variantes

A asna simples, como o próprio nome indica é dotada de uma geometria elementar, constituída apenas por 2 elementos principais, sendo estes a Linha e as Pernas, podendo nalguns casos possuir também um Pendural (Figura 5).

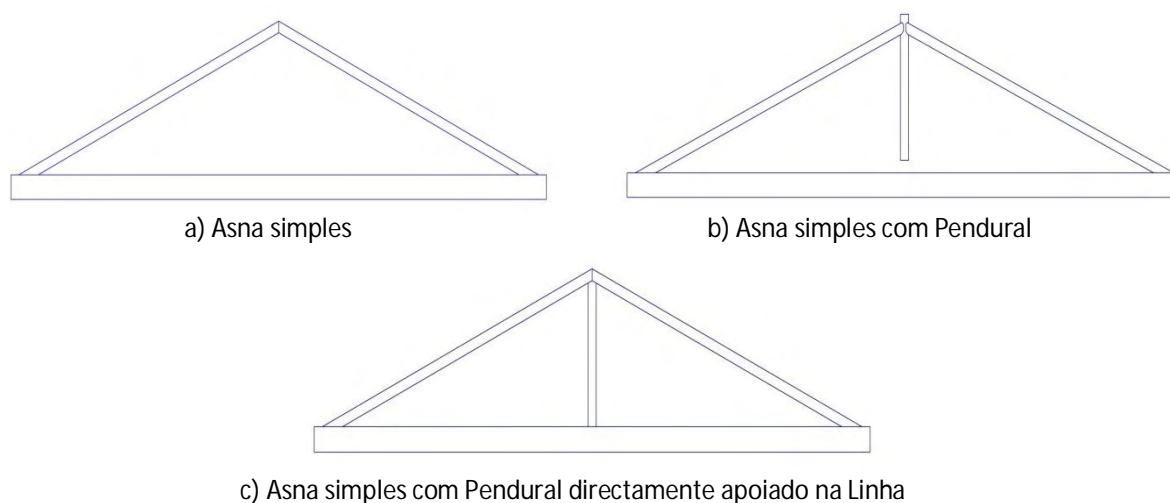


Figura 5 Diferentes geometrias de asnas simples [4]

Na asna simples sem Pendural, as Pernas constituem um arco de três rótulas, onde as reacções horizontais são providenciadas pelo esforço de tracção da Linha, Figura 5 (a). O Pendural, quando existente, serve principalmente para facilitar a união entre as Pernas, e também para servir de apoio intermédio à Linha através de ligações metálicas, de modo a que a deformada da Linha devido à fluência da madeira não seja muito pronunciada, Figura 5 (b), no caso em que o Pendural está directamente ligado à Linha,

Figura 5 (c), a Linha passa a estar carregada a meio vão, ficando esta sujeita também a esforços de flexão e de corte, agravando assim a sua deformada. Dentro das asnas de geometria simples, esta é a menos aconselhável, devido à ocorrência de deformadas elevadas a meio vão.

Neste tipo de asnas simples, é normal efectuar-se um reforço das ligações com recurso a pregos e outros elementos metálicos. Este reforço vai contribuir para uma melhor distribuição dos esforços entre os diversos elementos, mas também irá conferir alguma rigidez às ligações [5].

A geometria simples sofreu ao longo do tempo diversas transformações, passando de uma geometria elementar para sistemas cada vez mais complexos e elaborados, quer ao nível do número de elementos constituintes da asna como também ao nível do sistema de ligação entre os diversos elementos.

Uma das geometrias mais utilizada em Portugal é a asna de Palladio, que tem como base a geometria simples com Pendural. Tendo a particularidade de se adicionarem duas Escoras apoiadas na base do Pendural, dividindo a Perna em duas partes [5].



Figura 6 Asna de Palladio

Estas Escoras irão sofrer esforços de compressão, uma vez que as madres deverão estar exactamente colocadas sobre os nós formados entre as Pernas e as Escoras, indo assim contribuir para uma melhoria do comportamento à flexão da estrutura, permitindo ao mesmo tempo solicitações de valor superior [5].

2.2.2. Asna composta

Esta geometria é normalmente utilizada quando é necessário vencer vãos superiores a 8 metros, uma vez que a asna de Palladio não oferece um comportamento satisfatório para vãos tão elevados. Ao ser necessário um maior vão, também será necessário um maior número de madres. Como as Pernas das asnas não são dimensionadas para resistir à flexão, é necessário adicionar Escoras. Para vencer a componente vertical da força de compressão existente nas Escoras, é necessária a presença de um novo Pendural, que liga a Perna à Linha da asna, originando uma geometria composta, apresentada na Figura 7 [4].

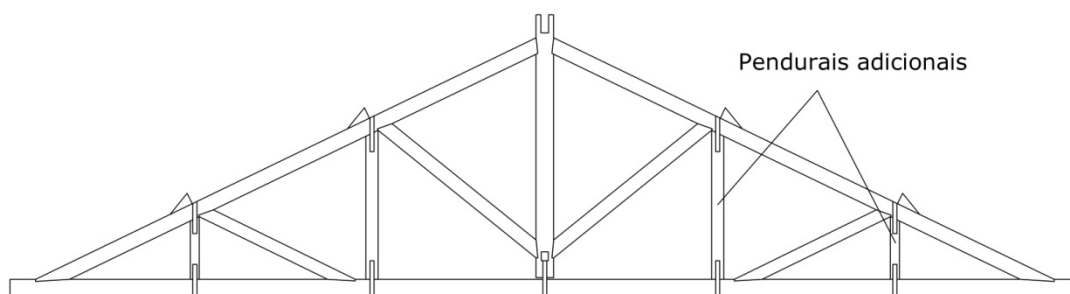


Figura 7 Asna composta [6]

Para que o esforço de flexão na Linha da asna seja o mais diminuto possível, a Linha deverá estar separada de todos os Pendurais, reduzindo assim o valor da deformada final. Para esta geometria, os vãos atingidos normalmente não excedem os 13-14 metros.

2.2.3. Asna em tesoura

Para além das asnas com recurso a Pendural e a Linha, podem fazer-se asnas sem recorrer a estes 2 elementos, este tipo de asnas denominam-se por asnas em tesoura ou por asnas em Cruz de Santo André. Contudo é habitual nesta geometria a presença do Pendural, servindo apenas para facilitar a ligação entre as duas Pernas da asna [7].



Figura 8 Asna em tesoura

Nesta configuração, as duas Pernas são consolidadas por duas Escoras partindo da base inferior daquelas e indo encontrar a Perna oposta sob a madre.

2.2.4. Asna de Mansarda

Os telhados à mansarda são formados por duas águas quebradas, constituindo quatro planos inclinados 2 a 2. Os superiores com pequena inclinação formando o telhado propriamente dito, e os inferiores diferindo pouco da vertical constituindo as paredes do último andar ou mansarda.

Este tipo de asnas servem para rematar os edifícios quando se quer aproveitar o vão do telhado para habitação, podendo concorrer como motivo ornamental para decoração de edifícios [7].



Figura 9 Asna de mansarda

Apesar deste tipo de asnas em madeira oferecer a vantagem de se poder usufruir de mais um piso num edifício, é um tipo de cobertura que não se recomenda, uma vez que as mansardas no Inverno são quase sempre húmidas e frias, em consequência da pequena espessura das paredes geralmente cobertas de chapa de zinco. Pela mesma razão, no Verão este tipo de cobertura, torna-se insuportavelmente quente [7].

2.2.5. Asna com lanternim

Este tipo de cobertura aplica-se sempre que se necessita de uma boa ventilação num edifício. Esta geometria é formada pela Linha, duas Pernas e um nível, constituindo o seu conjunto, um trapézio. Os Pendurais elevam-se acima das Pernas, constituindo os prumos do lanternim formando a armação deste uma pequena asna composta de Linha, Pernas e Pendural. Os lados do lanternim são geralmente guarnecidos de persianas para permitir a ventilação do edifício [7].

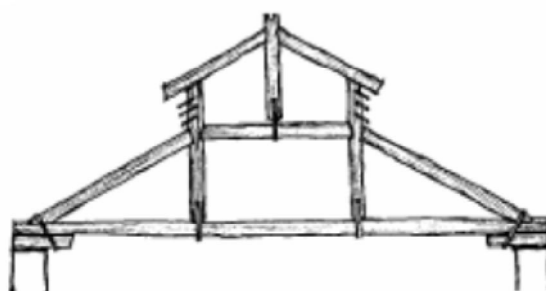


Figura 10 Asna com lanternim [7]

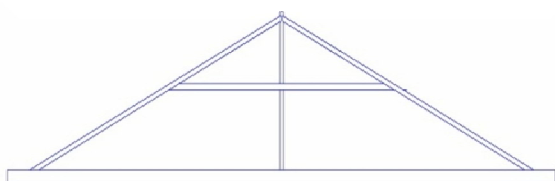
A asna em lanternim era bastante usada em cavalariças, oficinas, mercados, entre outros estabelecimentos.

2.2.6. Outras Geometrias

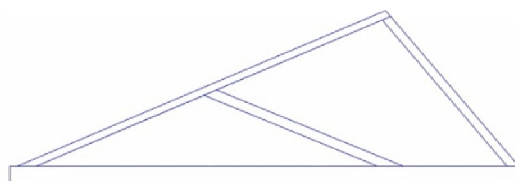
Segundo Costa [8], em Portugal, embora não com tanta frequência, são usadas também outros tipos de geometrias, tais como, asna de nível, figura 11 (a), asna de alpendre, figura 11 (b), asna fabril simples, figura 11 (c), asna fabril composta, figura 11 (d) e asna fabril de Escoras, figura 11 (e).



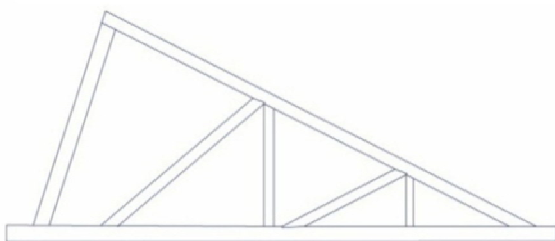
a) asna de nível



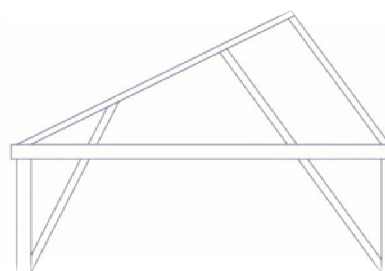
b) asna de alpendre



c) asna fabril simples



d) asna fabril composta



e) asna fabril com Escoras

Figura 11 Geometrias de asnas [5,8,9]

2.3. COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DAS ASNAS SIMPLES

As asnas de madeira, estão essencialmente sujeitas a uma tensão normal associada a esforços axiais e a momentos flectores induzidos pelo seu peso próprio e também sujeita a cargas aplicadas assimetricamente (neve e sismos) [4]. De vários estudos realizados e análises numéricas efectuadas, retiraram-se algumas conclusões acerca do comportamento das asnas, dos quais se salientam [2, 4]:

- As Pernas são os elementos mais carregados, apresentando tensões normais e de corte. O Pendural está submetido à tracção, as Escoras à compressão e a Linha está essencialmente traccionada mas exhibe também flexão devido ao seu peso próprio;

- Numa estrutura plana como é a asna, quando submetida a cargas pontuais aplicadas directamente nos seus nós, sem provocar qualquer flexão, a distribuição de esforços é feita em função da sua geometria;

- A colocação das madres com excentricidade relativamente aos nós altera a distribuição de esforços na asna, em particular nas Pernas;

- A Linha deve estar suspensa no Pendural de forma a reduzir as deformações devidas ao peso próprio. A ligação deve ser articulada e impedir as deformações no plano ortogonal ao plano da estrutura;

- As ligações Perna-Linha são as mais condicionantes, não apenas pelos esforços que aí se concentram mas por serem zonas onde a deterioração biológica é mais frequente;

- Os apoios devem ser capazes de resistir a movimentos horizontais. As forças de atrito não são suficientes para resistir a movimentos horizontais causados por exemplo, por sismos.

Apesar de todas estas recomendações, a chave para um bom funcionamento estrutural de uma asna está na escolha da configuração e geometria da asna. As asnas de madeira foram pensadas e desenhadas para se comportarem como uma estrutura plana submetida a cargas pontuais nos nós, de modo a causar apenas forças axiais nos diversos membros.

Quando o número de madres é superior ao número de Pendurais, a segurança da estrutura é comprometida. Neste caso, as Pernas são sujeitas a momentos flectores, que podem levar ao mau funcionamento de toda a estrutura. Como regra prática, o número de Pendurais deverá ser igual ao número de madres da cobertura em causa [4].

2.4. LIGAÇÕES

Numa estrutura em madeira, um dos aspectos fundamentais e uma das preocupações a ter, recai nas ligações entre os diversos elementos. Estas ligações podem

ter várias configurações e feitas com recurso a diversos materiais, sendo mencionadas a seguir, as mais importantes e mais utilizadas.

2.4.1. Ligações tradicionais

A forma mais antiga de efectuar estas ligações é através das chamadas ligações tradicionais ou samblagens, onde a transmissão de esforços entre os elementos se dá pela acção do atrito e compressão na interface dos elementos em causa [10].

O contacto entre os elementos a unir é normalmente realizado por dentes, podendo estes ser de três tipos distintos; o dente simples anterior, dente simples posterior e dente duplo (Figura 12).

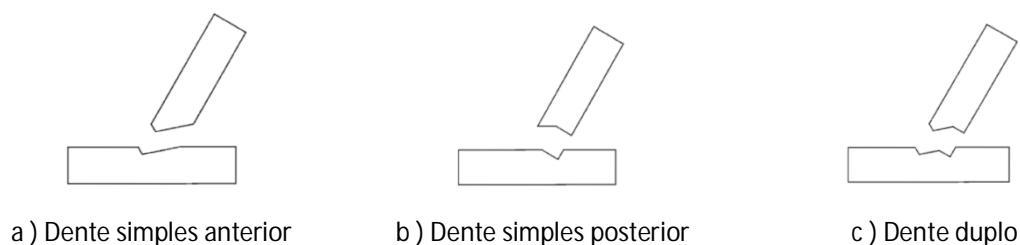


Figura 12 Ligações tradicionais de dente [4]

Este contacto pode também ser complementado através da execução de uma respiga e mecha (Figura 13), onde a respiga corresponde a uma saliência criada num dos topos de um elemento, que irá encaixar numa reentrância criada no outro elemento a que se quer fazer a ligação. A esta reentrância dá-se o nome de mecha.

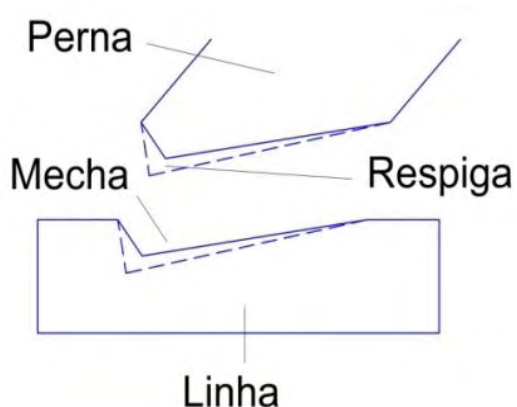


Figura 13 Pormenores de encaixe com recurso a mecha e respiga [4, 11]

Estas ligações com recurso a mecha e respiga, servem essencialmente para assegurar a perfeita conexão entre as peças e previnem ao mesmo tempo deslizamentos laterais das mesmas. Em consequência, exigem um grau de perfeição elevado, de modo a que a ligação tenha um comportamento mais satisfatório possível. Este grau de perfeição só é possível através de mão-de-obra qualificada e experiente [8].

2.4.2. Ligadores Metálicos

Com a descoberta do aço, e com a necessidade de construir em larga escala, as ligações por samblagens passaram a ser substituídas por ligações com recurso a elementos metálicos. Estes elementos metálicos, têm a vantagem de estabilizar a ligação, impedir o deslizamento lateral das peças, de prever e responder satisfatoriamente a inversões de esforços e servem também de complemento às ligações por entalhe [5].

Os ligadores de aço correntes: incluem os ligadores de aperto (*fasteners*), cuja função é apertar e juntar as peças de madeira a ligar, e os ligadores para intercalar (*connectors*) cuja função é reduzir a concentração de tensões no plano de corte das ligações, atenuando o escorregamento nesse plano. Os ligadores de aperto correspondem aos ligadores do tipo cavilha, tais como, os pregos, parafusos de porca, parafusos de enroscar e agrafos. Os ligadores para intercalar correspondem às placas denteadas e aos anéis (Figura 14) [12].

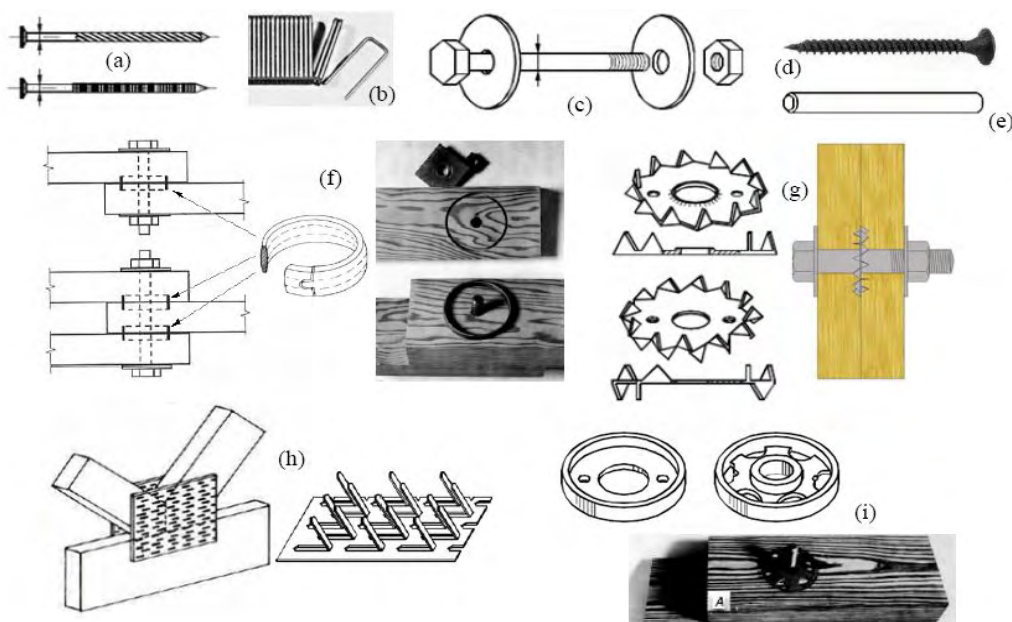


Figura 14 Ligadores correntes: (a) pregos; (b) agrafos; (c) parafuso de porca e anilhas; (d) parafuso de enroscar; (e) cavilha; (f) anel; (g) placas denteadas; (h) chapa metálica denteada; (i) placa circular com rebordo [12]

Actualmente existem também soluções de ligações para estruturas correntes baseadas em chapas enformadas a frio. Esta técnica permite a fabricação em série de uma diversidade enorme de ligadores, adaptáveis às mais variadas situações, geometrias, dimensões e níveis de esforço (Figura 15), e são geralmente usadas em associação com pregos ou parafusos de enroscar [12].

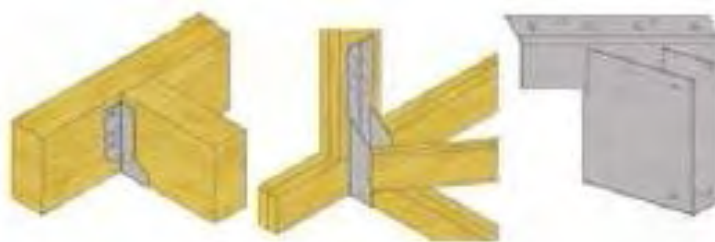


Figura 15 Chapas enformadas a frio [12]

São ainda de referir as chapas pregadas e as chapas metálicas denteadas, ligadores destinados a aplicar à face das peças de madeira que são ligadas sem sobreposição. Dentro deste tipo de ligação, existem os pés-de-galinha, bandas metálicas e os tês. Este tipo de ligações é bastante utilizado em asnas de madeira, sendo que os pés-de-galinha são utilizados para a ligação das Perna-Pendural, os tês para a ligação Perna-Escora e as braçadeiras que irão para a ligação Perna-Linha (Figura 16) [5].

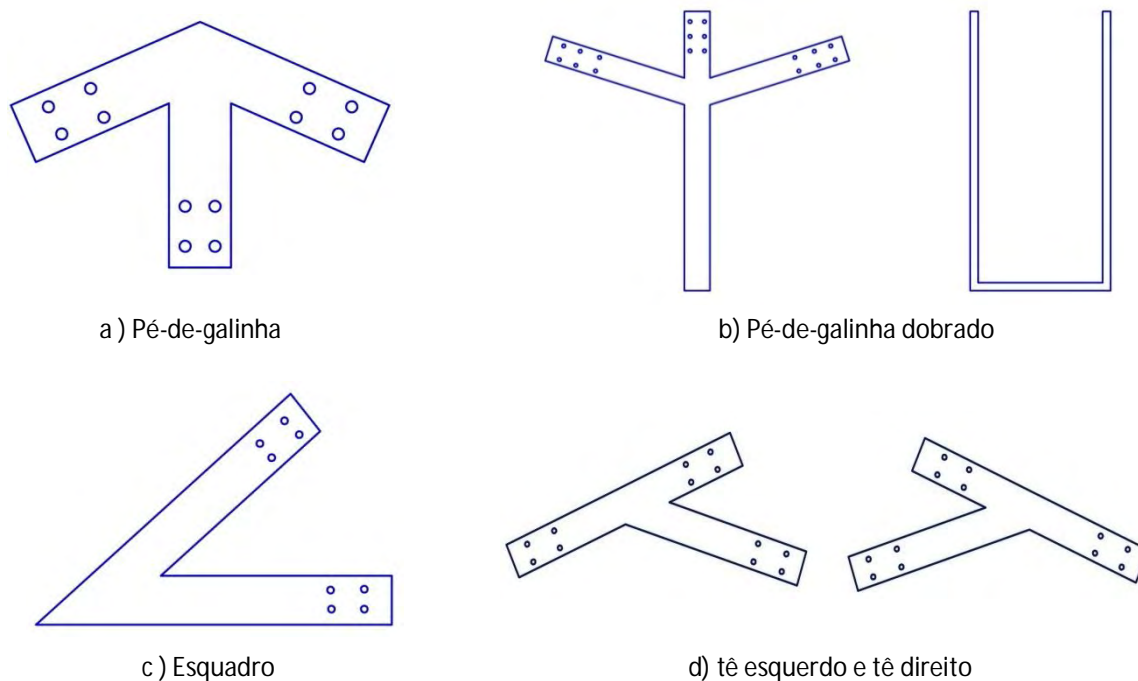


Figura 16 Elementos de ligações metálicas [13]

Todos estes tipos de ligadores metálicos, para funcionarem satisfatoriamente, deverão ser dotados de uma boa durabilidade, resistência à corrosão, resistência ao fogo e têm que ser capazes de variar de dimensão, de modo a acompanhar as variações de dimensão da madeira, quer esta ocorra por retracção ou dilatação. Na Figura 17 apresenta-se uma possível distribuição de ligadores metálicos pelas ligações de uma asna de madeira.

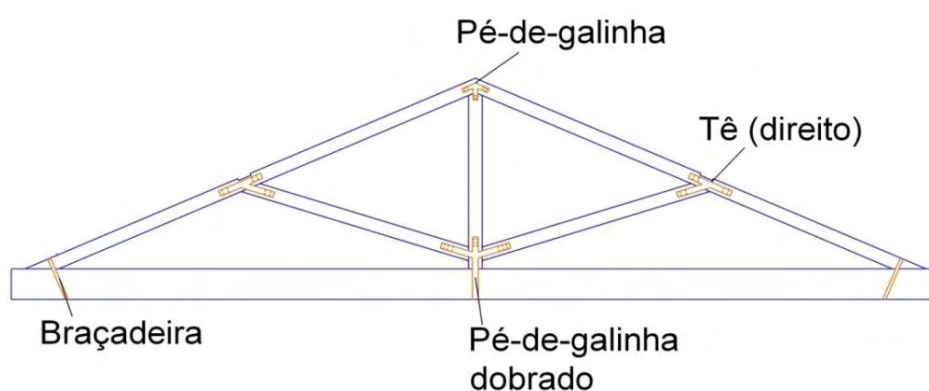


Figura 17 Asna de madeira com ligações metálicas

2.4.3. Exigências e princípios gerais das ligações

Os requisitos a exigir de uma ligação prendem-se com a resistência, a deformação, a capacidade de acomodar a inversão das forças actuates e o modo de rotura. A estes podem acrescentar-se a rigidez, a ductilidade, a sua resistência ao fogo e à corrosão e, talvez mais importante por influenciar os aspectos anteriores, a pormenorização da própria ligação, Madsen [14] citado por Palma *et al.* [15].

Estes princípios gerais aplicam-se às ligações tradicionais e também às mais modernas.

Resistência

As ligações devem ter uma capacidade resistente adequada às forças que têm de transmitir. Em termos de cálculo, as ligações apresentam dificuldades muito maiores comparativamente aos outros elementos da estrutura. Acresce ainda, que sendo a madeira um material com comportamento anisotrópico, cuja resistência na direcção perpendicular às fibras é muito inferior à resistência na direcção paralela, a rotura pode ser condicionada por efeitos que à primeira vista seriam desprezáveis, mas que nas zonas de ligação se amplificam devido à concentração de tensões.

Deformação

Antigamente a avaliação das deformações nas ligações não tinham grande relevância no processo de cálculo e dimensionamento de uma estrutura. Contudo, o EC5 [1] estipula que a influência das deformações nas ligações deve ser em geral considerada, através da sua rigidez (rotacional).

Inversão do sentido das forças actuates

Este critério é muito importante na utilização de ligações tradicionais. Estas transmitem os esforços essencialmente por contacto pelo que são frágeis aquando da inversão de esforços. Daí que as ligações tradicionais de madeira, normalmente realizadas através de entalhes, são complementadas pela colocação de elementos metálicos com a função de manter o contacto entre as peças ligadas quando existe a possibilidade de inversão de forças.

Modo de rotura

O modo de rotura de uma ligação tem grande importância na avaliação da sua adequabilidade a cada situação estrutural concreta. Modos de rotura com elevada ductilidade são na maioria das situações desejáveis, pois as consequentes grandes deformações que antecedem a rotura constituem um aviso do estado da estrutura e, por outro lado, permitem a dissipação de energia.

Rigidez

A rigidez das ligações é bastante importante na distribuição de esforços e nas frequências próprias da estrutura. Contudo, na concepção de uma asna tradicional como estruturas treliçadas, a influência da rigidez das ligações faz-se sentir sobretudo quando é solicitada por acções assimétricas ou cargas aplicadas fora dos nós [10].

Na grande maioria dos casos de estudo, a modelação estrutural é realizada assumindo que as ligações entre os vários elementos estruturais ou são rotuladas ou são rígidas, quando o seu verdadeiro comportamento está algures entre estas situações extremas. As consequências destas simplificações podem até, nalguns casos, ter uma influência reduzida no dimensionamento dos elementos estruturais, mas as consequências de desprezar os momentos nas ligações podem ser bastante graves, Hansson *et al.* [16] citado por Palma *et al.* [15].

Ductilidade

A ductilidade é essencial na resposta da estrutura a solicitações dinâmicas. A madeira exhibe um comportamento frágil, pelo que a ductilidade das ligações tem de ser assegurada através de outros mecanismos, tais como os elementos metálicos.

2.5. ANOMALIAS MAIS COMUNS

Nos dias de hoje existem muitas estruturas que necessitam de serem reabilitadas, devido não só ao seu envelhecimento natural, mas também à falta de manutenção, erros humanos de projecto e concepção e a factores acidentais. As anomalias mais comuns em estruturas de madeira, podem ser subdivididas em três classes distintas.

A primeira classe, corresponde às anomalias de origem físico-química e de origem biológica (Figura 18), normalmente causadas por agentes atmosféricos e agentes xilófagos respectivamente. Estas anomalias traduzem-se pela perda de resistência ou pela variação de secção e cor das peças.

Os organismos que costumam provocar este tipo de anomalias são:

- A água da chuva, causando variações bruscas de humidade entre a membrana exterior e o interior da madeira, criando tensões que originam fendas e consequentemente diminuem as características mecânicas da madeira [17];

- Radiações solares, para além de provocar a alteração cor da madeira (acinzentada), a acção dos U.V. sobre a lenhina fazem com que se dê a separação da membrana exterior das paredes celulares, criando assim um aspecto de desfibramento superficial na madeira [17];

- Bactérias, que se alimentam sobretudo de celulose e hemicelulose, que são constituintes da parede celular localizando-se perto dos raios lenhosos, resultando numa mudança de cor e decomposição das fibras da madeira [17];

- Algas, que provocam a alteração da coloração da madeira com o aumento da absorção de água e das radiações solares [17];

- Fungos, que destroem parte ou mesmo todos os seus constituintes por acção enzimática, provocando assim, podridões. Devido a isto, a madeira perde toda ou quase toda a sua resistência mecânica. A infecção dá-se pela germinação de esporos ou por crescimento da estrutura filamentosa já existente na zona de contacto com a madeira [3];

- Carunchos, estes atacam geralmente a madeira seca. A infestação dá-se geralmente pela eclosão de ovos em fendas ou poros de madeira que posteriormente dão origem a larvas, abrindo galerias de diâmetros proporcionais ao seu desenvolvimento. Atingindo a forma adulta o insecto completa o seu ciclo e sai da madeira abrindo orifícios visíveis na superfície [3];

- Térmitas, estas vivem em colónias e escavam longas galerias na madeira, alimentando-se desta. As consequências do seu ataque podem tornar-se muito severas, uma vez que só se torna exteriormente visível numa fase muito adiantada. A identificação da peça destruída faz-se pela observação do aspecto laminado da madeira,

resultante da destruição das camadas de Primavera sem que tenham sido praticamente lesadas as de Verão [3].

Estas anomalias de origem biológica são mais frequentes nas zonas dos apoios, devido à presença de águas infiltradas e devido à falta de arejamento [5].



Figura 18 Anomalias de origem biológica [18, 19]

A segunda classe de anomalias, diz respeito a exigências estruturais, devendo-se sobretudo a:

- Alteração da função da estrutura ao longo da sua vida, traduzindo-se em cargas superiores às que foram utilizadas para o dimensionamento das peças [5];
- Ausência de contraventamento nos planos da cobertura [5];
- Espaçamentos incorrectos entre asnas [17];
- Perda da secção provocada pela acção dos agentes xilófagos [17];
- Utilização de madeira verde, podendo originar deformações elevadas, devidas ao efeito de fluência [17];
- Ligações mal dimensionadas ou mal executadas, podendo originar deformações nos elementos da estrutura em causa [17].

A terceira e, última classe, prende-se às concepções construtivas e estruturais inadequadas. Estas concepções deficientes podem induzir esforços num determinado elemento, que pode comprometer a estabilidade de toda a estrutura. Como exemplos desta anomalia podem ver-se:

- Ligações entre Pendural e Linha inapropriadas [5];
- Aplicação das madres com excentricidades relativamente aos nós da asna (Figura 19);

- Aplicações de esforços de corte na Linha [5];
- Encurvadura dos elementos comprimidos devido ao excesso de esbelteza das peças de madeira [17];
- Assimetria de cargas, podendo causar empenamento dos elementos [17];
- Infiltrações ao nível da cobertura, normalmente, em consequência da má execução dos sistemas de impermeabilização.



Figura 19 Excentricidade das madres em relação ao nó [10]

2.6. TÉCNICAS DE REFORÇO MAIS COMUNS

No âmbito da reabilitação e recuperação de estruturas em madeira, o tipo de intervenção a realizar é bastante importante. A acção de reabilitação pode passar pela substituição total ou apenas parcial dos elementos danificados.

Segundo Branco [5], os métodos de reforço podem ser divididos em três grupos:

1. Método tradicional, que consiste na substituição das zonas degradadas por peças novas, de dimensões semelhantes às originais;
2. Método mecânico, que consiste na adição de elementos metálicos ou de materiais compósitos (cavilhas, esquadros, braçadeiras, entre outros);
3. Método adesivo, que consiste na substituição da parte deteriorada por argamassa de resina epoxídica ligada à madeira sã (Figura 20).



Figura 20 Aplicação do método adesivo (resinas epoxy) [5]

Como em Portugal, o método mais utilizado para efectuar o reforço das estruturas é o método mecânico com recurso a elementos metálicos, de seguida são referidos os elementos mais utilizados para o reforço de estruturas em madeira.

O uso de elementos metálicos tem como principal objectivo prevenir os deslocamentos para fora do plano da ligação. Hoje em dia, o reforço contempla também o comportamento da ligação no seu próprio plano e o de garantir o contacto entre as peças ligadas. Nas zonas sísmicas em particular, o reforço pode prevenir a degradação da resistência da ligação e evitar a perda de contacto entre os elementos ligados, resultado da diminuição das forças de compressão. Sob efeito de acções cíclicas, o reforço afigura-se como a única solução para a garantia de estabilidade da ligação [4].

Dentro deste método, os elementos metálicos mais utilizados são: o esquadro, o varão de aço e a braçadeira (Figura 21).

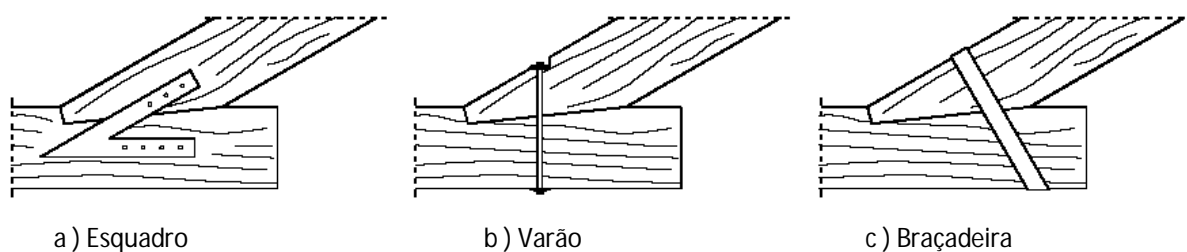


Figura 21 Reforço mecânico com elementos metálicos [21]

Esquadros metálicos

Desde a sua colocação, os esquadros metálicos influenciam bastante o reforço da ligação, pois verifica-se que se forem colocados antes da estrutura ser erguida, ou seja, aquando o início do carregamento, os esquadros são mobilizados e intervêm na resposta da ligação, não permitindo o fecho das folgas entre as peças. Se, por ventura, forem aplicados quando a estrutura já está montada, por exemplo numa acção de reabilitação, e já não há folgas entre as peças, só serão solicitados quando o carregamento provocar deformações significativas na ligação [15].

Uma ligação reforçada com esquadros apresenta um comportamento simétrico e não linear quando o ângulo aumenta ou diminui. Com este reforço os deslocamentos máximos, a resistência da ligação e a capacidade de dissipação de energia são superiores.

Devido à grande superfície de aço exposta, a eficácia deste reforço pode ser comprometida numa situação de incêndio.

Varão

Observa-se que, comparativamente à situação sem elementos metálicos, a ligação é mais rígida no sentido de abertura do ângulo, embora atinja deslocamentos máximos pouco inferiores. Por outro lado, quando se fecha o ângulo, os deslocamentos máximos são agora muito superiores, devido ao facto do parafuso impedir que as peças escorreguem e se desencaixem [4, 15].

Ao impedir o desencaixe das peças e através da sua própria deformação, o parafuso aumenta a capacidade da ligação para dissipar energia. O esmagamento localizado da madeira em torno do parafuso resulta na ovalização do furo, permitindo escorregamentos cada vez maiores, o que origina um maior *pinching* dos ciclos e redução da energia dissipada [15].

Braçadeira

No caso da ligação com a braçadeira, o deslocamento máximo quando o esforço provoca a abertura do ângulo é semelhante ao da situação sem reforços metálicos, mas quando se fecha o ângulo os deslocamentos são agora muito superiores, devido ao facto da braçadeira impedir que as peças escorreguem e se desencaixem. Isto permite

aumentar a sua resistência e a capacidade de dissipação de energia, embora o mecanismo de dissipação seja o mesmo que na situação sem reforço (atrito no escorregamento entre peças) [15].

Tal como os esquadros, este reforço apresenta uma fraca resistência ao fogo, pois a superfície de aço exposta é significativa.

CAPÍTULO 3. DIMENSIONAMENTO E VERIFICAÇÕES DE SEGURANÇA: EC-5 PARTE 1-1

Neste capítulo, são enunciadas algumas das verificações utilizadas no dimensionamento de elementos e ligações da asna. Todas essas verificações têm em conta o Estado Limite Último de resistência definido pelo Eurocódigo 5 Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios [1]. Para o efeito, utilizam-se os coeficientes parciais de segurança para as acções e para os materiais apresentados nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1 Coeficientes parciais de segurança dos materiais [1]

Estados limite a considerar	γ_M
Combinações fundamentais	
Madeira maciça	1.3
Glulam	1.25
LVL, OSB	1.2
Combinações acidentais	1.0

Tabela 2 Coeficientes parciais de segurança das acções [22]

Acções a considerar	Coeficientes parciais de segurança
Acções permanentes	1.35
Acções variáveis	1.50

3.1. BASES DE CÁLCULO

3.1.1. Classes de serviço

A classe de serviço da madeira está directamente relacionada com a humidade a que a madeira está sujeita. Esta humidade tem influência directa nas suas propriedades mecânicas de tal forma que, ao aumentar o teor de humidade, estas diminuem. Assim, para se ter em conta este factor, estabeleceram-se três classes de serviço:

Classe de serviço 1: caracterizada por um teor de água dos materiais correspondente ao teor de água de equilíbrio para um ambiente caracterizado por uma temperatura de 20°C e uma humidade relativa do ar ambiente, excedendo 65% somente durante algumas semanas do ano;

Classe de serviço 2: caracterizada por um teor de água dos materiais correspondente ao teor de água de equilíbrio para um ambiente caracterizado por uma temperatura de 20°C e uma humidade relativa do ar ambiente, excedendo 85% somente durante algumas semanas do ano;

Classe de serviço 3: caracterizada por condições climáticas conduzindo a valores do teor de água dos materiais superiores aos que se verificam na classe de serviço 2.

3.1.2. Classes de Duração das Cargas

A duração das cargas influencia significativamente a resistência da madeira, de tal forma que quanto maior a duração, menor a resistência. Para os cálculos de resistência e deformação, as acções devem fazer-se corresponder a uma das 5 classes de duração que o EC-5 [1] estabelece.

Tabela 3 Classes de duração das acções [1]

Classe de duração das acções	Duração acumulada da carga característica
Permanente	Mais de 10 anos
Longa Duração	6 Meses - 10 anos
Média Duração	1 Semana - 6 meses
Curta Duração	Menos de 1 semana
Instantânea	

3.2. VALORES DE CÁLCULO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA

O valor de cálculo (X_d) é o valor que se considera seguro no cálculo pelos estados limite da estrutura. Este valor vai ser obtido através do valor característico, dividindo este por um coeficiente de segurança, que se corrige em função da duração da carga e do teor de humidade.

$$X_d = K_{mod} \frac{X_k}{\gamma_M} \quad (1)$$

em que:

X_k - valor característico da propriedade;

γ_M - coeficiente parcial de segurança do material;

k_{mod} - factor de modificação que tem em conta o efeito da duração da carga e do teor de humidade, nos valor resistentes.

3.3. VALORES DE CÁLCULO DOS EFEITOS DAS ACÇÕES

O valor de cálculo de uma acção é obtido através das acções características que estão a ser aplicadas na estrutura, majoradas por um coeficiente parcial de segurança. Podendo-se definir através da seguinte expressão:

$$F_d = \gamma F \times F_k \quad (2)$$

3.4. VERIFICAÇÕES DE SEGURANÇA AO NÍVEL DOS ELEMENTOS DA ASNA

A geometria destas estruturas implica que os esforços que lhes são aplicados se traduzam apenas em esforços axiais de tracção e compressão, e de flexão, devido ao peso próprio dos seus elementos ou à incorrecta aplicação das cargas.

Em seguida, apresentam-se as verificações de segurança a realizar numa asna de madeira.

3.4.1. Compressão (paralela ao fio)

Nas peças que não seja considerada a encurvadura deve assegurar-se a veracidade da seguinte expressão.

$$\sigma_{c,0,d} \leq f_{c,0,d} \quad (3)$$

em que:

$\sigma_{c,0,d}$ – Tensão de compressão aplicada paralelamente às fibras;

$f_{c,0,d}$ – Tensão resistente à compressão do material, aplicada paralelamente às fibras.

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N}{A} \quad (4)$$

3.4.2. Tracção (paralela ao fio)

Nas asnas, tal como já foi referido, os esforços mais condicionantes são os axiais. Então além de serem verificados os esforços de compressão é também fundamental que o esforço de tracção seja verificado no dimensionamento. Devendo ser satisfeita a condição seguinte:

$$\sigma_{t,0,d} \leq k_h f_{c,0,d} \quad (5)$$

em que k_h obtém-se da seguinte forma:

$$\text{Madeira maciça} \quad k_h = \min \left\{ \frac{1,3}{(150/h)^{0,2}} \quad h < 150\text{mm} \right. \quad (6)$$

$$\text{Madeira lamelada} \quad k_h = \min \left\{ \frac{1,15}{(600/h)^{0,2}} \quad h < 600\text{mm} \right. \quad (7)$$

3.4.3. Flexão simples

Como a flexão sofrida pelas asnas é principalmente causada pelo seu próprio peso, não se vai verificar a existência de instabilidade lateral das peças.

Em flexão simples deve verificar-se

$$\frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad (8)$$

onde:

$f_{m,d}$ – Tensão resistente devido ao momento

$\sigma_{m,d}$ – Tensão actuante devido ao momento que pode ser calculada através:

$$\sigma_{m,d} = \frac{M}{I} v \quad (9)$$

onde:

M – Momento flector segundo o eixo em causa

I – Momento de Inércia segundo o mesmo eixo

v – Posição do centróide da peça

3.4.4. Flexão combinada com tracção

Como exemplo de um elemento sujeito a esta combinação de esforços, tem-se a Linha da asna que está sujeita sobretudo a esforços de tracção, mas também sujeita a

esforços de flexão. A verificação de segurança a efectuar nestes elementos será a seguinte:

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + K_m \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} &\leq 1 \\ \frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + K_m \cdot \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} &\leq 1 \end{aligned} \quad (10)$$

em que,

$$\sigma_{t,0,d} = \frac{F_t}{\text{Área Traccionada}} \quad (11)$$

$$f_{t,0,d} = \frac{K_{mod} \cdot f_{t,0,k}}{\gamma_M} \quad (12)$$

K_m - Representa o factor que tem em conta a redistribuição das tensões e os efeitos da heterogeneidade do material numa determinada secção.

$K_m = 0,7$, Para secções rectangulares

$K_m = 1$ Para todas as outras secções

3.4.5. Flexão combinada com compressão

Como exemplo de um elemento sujeito à combinação de esforços de flexão e compressão, tem-se a Perna, que é um elemento sujeito sobretudo a esforços de compressão, mas podendo também sofrer esforços de flexão.

$$\begin{aligned} \left[\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right]^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + K_m \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} &\leq 1 \\ \left[\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right]^2 + K_m \cdot \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} &\leq 1 \end{aligned} \quad (13)$$

Como a Perna é um elemento que pode estar sujeito a esforços de compressão de grandeza considerável, torna-se importante que se verifiquem as condições de instabilidade desse elemento, uma vez que este pode sofrer encurvadura para fora do plano da asna.

Para a verificação das peças à encurvadura lateral, utiliza-se o factor de redução K_{crit} ($K_{crit} \leq 1$) na resistência $f_{m,d}$, que é dado em função das dimensões da secção transversal e da distância entre os pontos das fibras comprimidas, firmemente travadas transversalmente.

A verificação quanto à instabilidade para elementos sujeitos à combinação de esforços de compressão e de flexão com fenómenos de instabilidade, é feita com recurso à seguinte expressão:

$$\left(\frac{\sigma_{m,d}}{K_{crit} \cdot f_{m,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{m,d}}{K_{c,z} \cdot f_{c,0,d}} \leq 1 \quad (14)$$

onde,

$$f_{m,d} = \frac{K_{mod} \cdot f_{m,k}}{\gamma_M} \quad (15)$$

$$f_{c,0,d} = \frac{K_{mod} \cdot f_{c,0,k}}{\gamma_M} \quad (16)$$

$$K_{c,z} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,z}^2}} \quad (17)$$

onde,

$$k_z = 0,5 \cdot (1 + \beta_c (\lambda_{rel,z} - 0,3) + \lambda_{rel,z}^2) \quad (18)$$

$$k_y = 0,5 \cdot (1 + \beta_c (\lambda_{rel,y} - 0,3) + \lambda_{rel,y}^2) \quad (19)$$

em que,

$$\beta_c = \begin{cases} 0,2 & \text{para madeira maciça} \\ 0,1 & \text{para Glulam e LVL} \end{cases}$$

$$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \quad (20)$$

$$\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \quad (21)$$

e,

$$K_{crit} = \begin{cases} 1 & \text{para } \lambda_{rel,m} \leq 0,75 \\ 1,56 - 0,75 \times \lambda_{rel,m} & \text{para } 0,75 < \lambda_{rel,m} \leq 1,4 \\ \frac{1}{\lambda_{rel,m}^2} & \text{para } 1,4 < \lambda_{rel,m} \end{cases} \quad (22)$$

em que,

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} \quad (23)$$

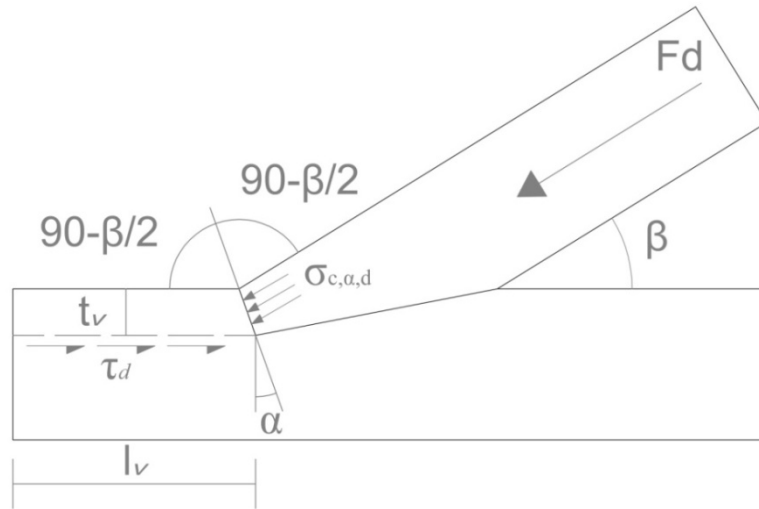
onde,

$$\sigma_{m,crit} = \frac{0,78 \cdot b^2}{h \cdot l_{ef}} \cdot E_{0,05}, \text{ para peças de secção rectangular} \quad (24)$$

3.5. VERIFICAÇÃO AO NÍVEL DAS LIGAÇÕES DA ASNA

Para esta verificação, considerou-se apenas a geometria presente no caso prático, que é uma ligação tradicional do tipo dente anterior sem mecha e respiga.

A verificação será feita somente para a ligação Linha-Perna, uma vez que é nesta ligação que existe maior risco de rotura, pois é a esta que chegam os maiores esforços (ligação mais próxima da zona de apoio), ocorrendo o elevado risco de esmagamento da madeira associado ao risco de ocorrer rotura por corte paralela ao fio.

**Figura 22** Esforços na ligação Linha-Perna

3.5.1. Verificação ao Esmagamento

A tensão de compressão utilizada para a verificação ao esmagamento dos elementos é dada pela seguinte equação:

$$\sigma_{c,\alpha,d} \leq \frac{f_{c,0,d}}{\frac{f_{c,0,d}}{f_{c,90,d}} \cdot \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} \quad (25)$$

onde,

$$f_{c,0,d} = \frac{K_{mod} \cdot f_{c,0,k}}{\gamma_M} \quad (26)$$

$$f_{c,90,d} = \frac{K_{mod} \cdot f_{c,90,k}}{\gamma_M} \quad (27)$$

$$\sigma_{c,\alpha,d} = \frac{F_d \cdot \cos^2 \left(\frac{\beta}{2} \right)}{b_{ef} \cdot t_v} \quad (28)$$

3.5.2. Verificação ao Corte paralelo ao fio

Relativamente à verificação ao corte, é efectuada com recurso à seguinte equação,

$$\tau_{v,d} \leq f_{v,d} \quad (29)$$

onde,

$$f_{v,d} = \frac{K_{mod} \cdot f_{v,k}}{\gamma_M} \quad (30)$$

A tensão tangencial paralela à direcção do fio, $\tau_{v,d}$, é dada pela equação (31)

$$\tau_{v,d} = \frac{F_d \cdot \cos^2\left(\frac{\beta}{2}\right)}{b_{ef} \cdot l_v} \quad (31)$$

Não se torna relevante para o caso prático a analisar, verificar a segurança das outras ligações nem de todos os outros elementos, uma vez que as suas dimensões não variam muito de elemento para elemento e mesmo de ligação para ligação. Como é ao nível das ligações Perna-Linha que se fazem sentir maiores esforços, basta verificar a segurança dessas ligações e dos elementos constituintes para que a segurança de toda a asna seja assegurada.

CAPÍTULO 4. AVALIAÇÃO DA ASNA COMPOSTA

A asna avaliada foi salva de uma operação de demolição de uma cobertura nas instalações fabris da empresa ADICO, localizada em Avanca.

Segundo Branco [4], a idade da asna não é conhecida ao certo, mas sabe-se no entanto que a empresa ADICO existe desde 1920 e que existem documentos que datam de 1942 onde já se poderia constatar a existência do armazém de onde foi salva a asna. Depois de salva, esta foi mantida armazenada no laboratório do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro aproximadamente 3 anos.



Figura 23 Asna em estudo

Na Figura 24, pode ver-se toda a geometria da asna alvo de estudo, assim como a nomenclatura utilizada para identificar cada elemento.

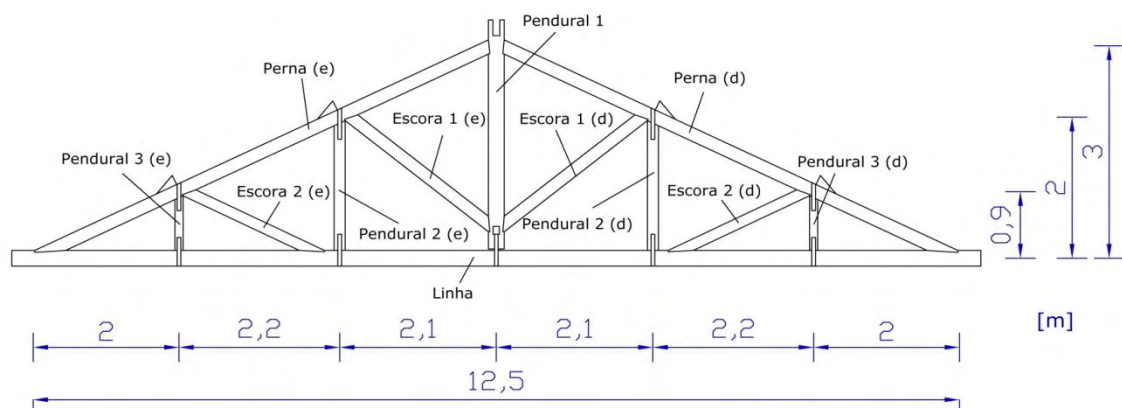


Figura 24 Geometria da asna e nomenclatura utilizada

4.1. INSPECÇÃO VISUAL

A primeira análise que se efectuou nas asnas foi uma inspecção visual, quer da sua geometria, quer do seu estado de conservação.

Durante a inspecção visual ficou claro a diferença de estados de conservação entre as duas faces da asna. Enquanto uma das faces se encontra num estado de conservação aparentemente bom, na face oposta são visíveis várias zonas em que se destacavam facilmente pedaços de madeira em resultado de um estado de degradação avançado. Esta diferença poderá ser explicada pelo facto de uma das faces ser constituída por madeira essencialmente do cerne da árvore (face em bom estado de conservação), enquanto a outra face era constituída por madeira do borne da árvore (face em mau estado de conservação). Como a madeira do borne é uma madeira menos densa (madeira mais jovem), os agentes xilófagos preferem alimentar-se dessa mesma madeira. Esta hipótese é sustentada pela presença em grande escala de orifícios de saída de xilófagos (caruncho) na face degradada (Figura 25).



Figura 25 Acção do caruncho na zona periférica dos elementos

Na Tabela 4, pode-se constatar as diferenças de durabilidade natural existente entre a madeira constituinte do cerne e borne, face a acção dos agentes xilófagos.

Tabela 4 Características de durabilidade natural da madeira de Pinho Bravo [23]

Durabilidade natural				
	Fungos	Térmitas	Carunchos	
			Pequenos	Grandes
Borne	Pouco durável	Susceptível	Susceptível	Susceptível
Cerne	Pouco a medianamente durável	Medianamente durável	Durável	Durável

Com base na inspecção visual foi ainda o levantamento de várias anomalias estruturais da asna, tais como o empeno da Linha, o contacto directo entre a Linha e o Pendural principal e também a inclinação de alguns elementos verticais para fora do plano da asna.

Na Figura 26 é visível o mau estado em que a ligação Perna-Pendural se encontrava. Este mau estado deve-se não só à acção dos xilófagos que enfraqueceram a madeira, mas também devido à falta de cuidados aquando o seu transporte e descarga para o laboratório. Devido a essa imprudência, a movimentação das asnas foi feita com a ajuda de uma grua em que o ponto de levantamento da asna foi somente a zona da ligação Perna-Pendural (zona de cumeeira). A força usada para levantar a asna resultou como uma inversão de esforços para a qual a asna não estava preparada, fazendo com que as ligações Perna-Pendural e Perna-Linha sofressem danos, havendo mesmo a rotura de alguns elementos.

**Figura 26** Estado da ligação Perna-Pendural

A acompanhar a avaliação visual, efectuou-se também uma avaliação sonora através do batimento com um martelo de silicone, com o intuito de encontrar zonas de maior degradação (interior) da asna em estudo.

Na Figura 27 apresenta-se o mapeamento global das anomalias encontradas durante a inspecção visual.

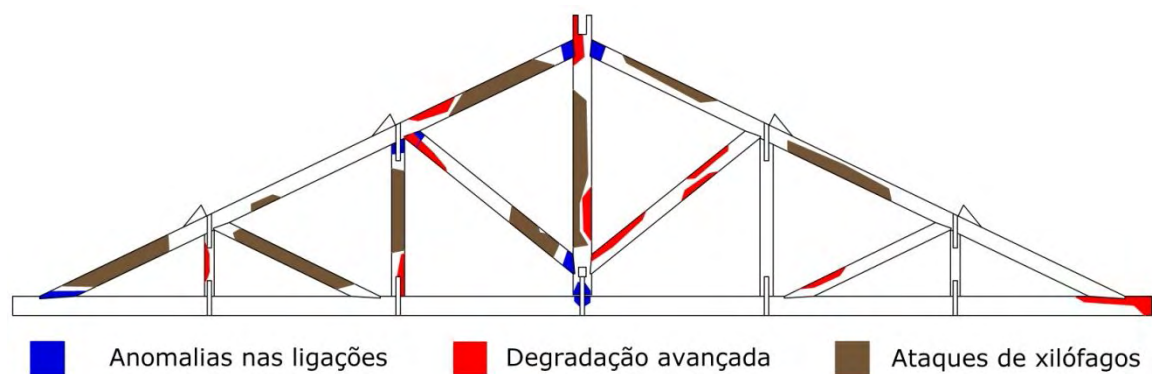


Figura 27 Mapeamento das anomalias encontradas

A acompanhar a avaliação visual, efectuou-se também uma avaliação sonora através do batimento com um martelo de silicone, com o intuito de encontrar zonas de maior degradação (interior) da asna em estudo.

4.2. AVALIAÇÃO GEOMÉTRICA

A madeira sendo um material natural e celular, logo bastante heterogéneo, não costuma apresentar secções constantes ao longo do seu desenvolvimento. Para que uma estrutura de madeira pudesse apresentar ao longo do seu comprimento secções constantes, seria necessário bastante trabalho de carpintaria e seria necessária uma peça de madeira sem grandes desvios e sem grandes anomalias.

Na asna avaliada, as secções transversais são rectangulares de madeira cortada e aparada, logo as variações de secção não são muito acentuadas. Há apenas a assinalar as variações encontradas ao nível do Pendural principal onde a secção intermédia é mais reduzida em relação à secção dos topos (Figura 28), sendo que nos topos tem uma secção de 22x9,5 cm e no centro chega a ter uma secção de 20x8,8 cm.



Figura 28 Diferença de secção (meio-topo)

Na Tabela 5 são representadas as secções de cada elemento e são referidas as dimensões das mesmas.

Tabela 5 Secções dos elementos

Elemento	Dimensões (Mín/Máx) [cm]	
Pendural 1	20x8,8	22x9,5
Linha	22x9,6	22x10,2
Pernas	17,7x10	18,1x10,2
Pendurais 2	15x8,8	16x9
Pendurais 3	11,3x8,2	12x8,9
Escoras 1	17,4x10	18x10
Escoras 2	14,9x9,2	15,3x9,5

Quanto à geometria das ligações, a maioria são do tipo tradicional (por entalhe ou samblagem), ou seja, feitas através de um trabalho de carpintaria apurado, onde os esforços são transmitidos por atrito e por compressão das interfaces. Na asna em estudo, as ligações tradicionais são todas do tipo dente simples anterior, sem recurso a mecha ou respiga.



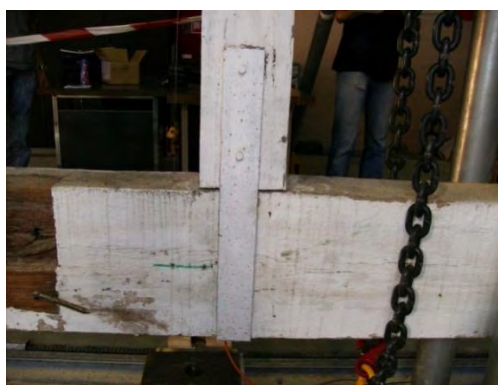
a) Ligação Perna-Linha



b) Ligação Pendural-Escoras

Figura 29 Ligações tradicionais

Na asna em estudo, existem também ligações realizadas com recurso a elementos metálicos, como é o caso das ligações dos elementos verticais (Pendurais), onde é utilizada uma chapa metálica dobrada que tem um funcionamento similar ao de um pé-de-galinha dobrado.



a) Ligação Pendural-Linha



b) Ligação Pendural-Perna

Figura 30 Ligações com elementos metálicos

CAPÍTULO 5. ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS (NDT)

A avaliação não destrutiva de materiais é por definição, a ciência que identifica e determina propriedades físicas e mecânicas de um determinado material sem alterar as suas funções e capacidades iniciais [25].

Os ensaios não destrutivos para madeira (NDT – *nondestructive tests*), diferem bastante dos testes realizados em materiais homogêneos ou isotrópicos tais como metal, vidro, plástico e materiais cerâmicos.

Nesses materiais, onde as propriedades mecânicas são conhecidas e controladas pelos processos de construção, os NDT são usados para detectar discontinuidades ou anomalias pontuais [25].

Como a madeira é um material biológico, as irregularidades ocorrem naturalmente e podem ocorrer de acordo com agentes de degradação presentes no ambiente circundante.

Na asna de madeira em estudo foram realizados os ensaios de Pilodyn®, Resistograph® havendo um controlo do teor de água de cada um dos elementos constituintes da asna através de medições com um humidímetro de agulhas.

5.1. TEOR DE ÁGUA

O teor de água da madeira é definido pela razão do peso de água e do peso da amostra seca em estufa e é normalmente representado sob a forma de percentagem [17]. Este teor de água tem grande influência nas propriedades mecânicas e até mesmo nas propriedades físicas da madeira.

Para efectuar a medição do teor de água na asna em causa, foi utilizado um Humidímetro electrónico de agulhas da CSA electronics (Figura 31).



Figura 31 Humidímetro electrónico

Este aparelho é de utilização bastante rápida e simples, sendo necessário escolher o grupo a que a madeira pertence, sendo possível escolher 3 grupos distintos de madeiras. Esta escolha é feita com base num catálogo que vem com o aparelho, onde figuram bastantes tipos diferentes de madeiras.

Depois de se saber a que grupo pertence a amostra, basta cravar os eléctrodos na madeira e efectuar a leitura do teor de água.



Figura 32 Modo de utilização do humidímetro electrónico

O teor de água da madeira foi medido em todos os elementos da asna, sendo apresentados os resultados médios na Tabela 6.

Tabela 6 Resultados do humidímetro

Elemento medido	Resultado (médio)
Linha	14.3
Pendural 1	12.1
Pendural 2 (e)	11.1
Pendural 3 (e)	12.2
Escora 1 (e)	13.1
Escora 2 (e)	12.6
Perna (e)	12.6
Pendural 2 (d)	11.5
Pendural 3 (d)	12.3
Escora 1 (d)	12.2
Escora 2 (d)	12.9
Perna (d)	12.5

Através da análise dos resultados obtidos com a medida do teor de água dos diversos elementos da asna, pode-se constatar que não existem grandes discrepâncias nos valores obtidos, existindo apenas a Linha em que o valor de teor de água é um pouco mais elevado.

Uma explicação plausível para este resultado é o facto de toda a Linha ser constituída por madeira maioritariamente do cerne. Como é ao nível do cerne que existe grande parte do transporte de seiva e é lá que se encontra grande parte dos fluidos resinosos, é expectável uma leitura superior do teor de água desse elemento.

5.2. PILODYN®

O ensaio com recurso ao Pilodyn® é um método fácil, barato e rápido de estimar indirectamente a densidade da madeira e também a sua qualidade e resistência. Este método, funciona através da penetração na madeira de um pino de aço impulsionado por uma mola com uma força constante, cuja profundidade de penetração é, em princípio, inversamente proporcional à densidade da madeira e, consequentemente, constitui uma medida do grau de degradação da madeira causada por fungos de

podridão [26]. No entanto, embora seja um método muito rápido e não destrutivo, sendo indirecto, poderá não traduzir correctamente a densidade da madeira. Isto deve-se ao facto de o pino apenas penetrar alguns milímetros na zona periférica do tronco, sendo apenas esta a zona avaliada, não contabilizando a zona interior do tronco.

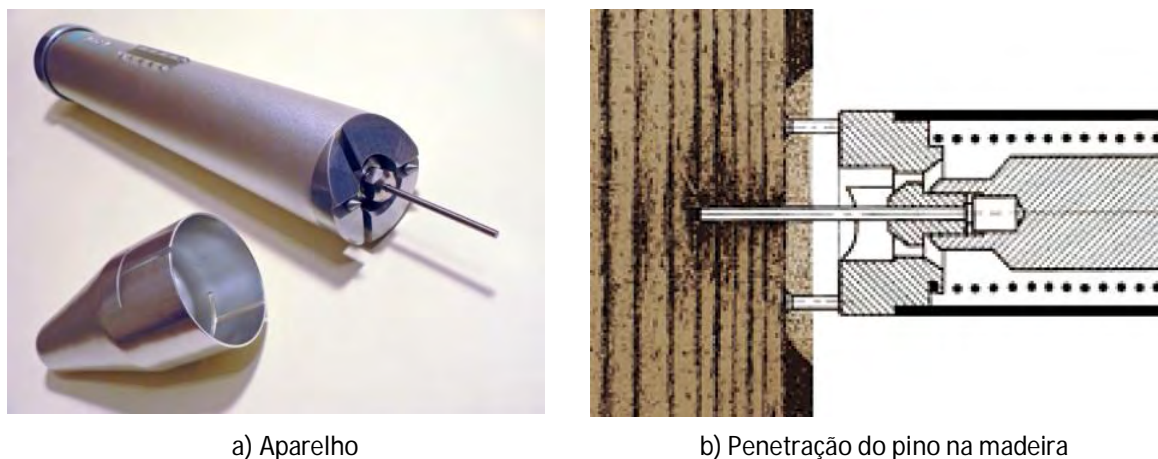


Figura 33 Pilodyn®[26]

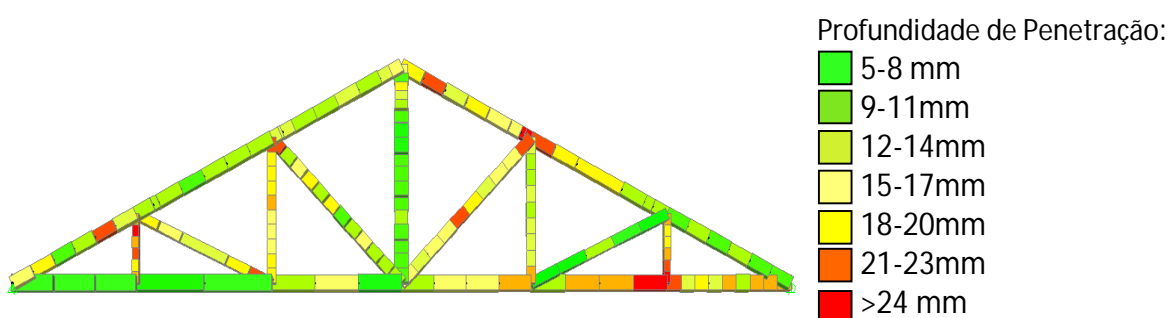
No presente estudo, o ensaio de Pilodyn® foi utilizado essencialmente com o fim de detectar zonas degradadas e posteriormente, de medir a redução de secção transversal em resultado da degradação superficial. Onde o valor de penetração do Pilodyn® foi mais elevado, foi ainda realizado o ensaio de Resistograph® com vista a ter uma ideia mais pormenorizada do estado do interior do elemento em causa.

Na Tabela 7 apresentam-se os resultados mais importantes dos ensaios de Pilodyn® realizados nos vários elementos constituintes da asna de madeira.

Tabela 7 Resultados Pilodyn®

Elemento	Número de Ensaios	Penetração média (mm)	Intervalo de penetração (mm)
Linha	31	11,9	5-23
Pendural 1	14	8,9	5-16
Pendural 2 (e)	21	14,3	9-19
Pendural 3 (e)	9	16,6	10-21
Escora 1 (e)	17	10	5-16
Escora 2 (e)	12	12,8	9-19
Perna (e)	26	11,7	5-20
Pendural 2 (d)	16	13	5-29
Pendural 3 (d)	6	15,7	12-20
Escora 1 (d)	15	13,3	9-20
Escora 2 (d)	13	9	5-15
Perna (d)	27	12,6	6-23

De maneira a analisar melhor os resultados do ensaio de Pilodyn®, foi elaborado um mapa onde são representados os diferentes intervalos de penetração (Figura 34).

**Figura 34** Mapeamento da profundidade de penetração do Pilodyn®

5.3. RESISTOGRAPH®

Na maioria dos casos, a inspeção visual não é suficiente para examinar convenientemente o estado conservação de uma peça em madeira. Com o auxílio de um Resistograph® pode-se ter uma ideia precisa, rápida e viável do estado em que se encontra a madeira, quer do interior quer do exterior de uma determinada peça [27].

O ensaio do Resistograph® consiste na introdução de uma agulha que realiza um microfuro, a uma velocidade constante, medindo a resistência que a madeira tem à rotação e à progressiva penetração da agulha.

À medida que a agulha vai penetrando ao longo da peça de madeira, o perfil é registado em papel e gravado na memória interna do equipamento para posterior passagem para computador. Este registo efectuado pelo Resistograph®, permite detectar zonas da madeira com variações de densidade e de resistência devidas a descontinuidades físicas, podendo estas serem devidas a fendas ou outras anomalias e até mesmo à degradação devido a agentes xilófagos [28].



Figura 35 Resistograph®

Na Figura 36, pode ver-se um exemplo da saída de dados do Resistograph®, sendo estes relativos à secção presente na mesma figura. A largura da peça examinada é de 11 cm, indicada na escala do eixo das abcissas, enquanto o eixo das ordenadas apresenta a força necessária para a agulha perfurar a madeira [28].

Na faixa que está com destaque em vermelho, é possível ver que 4 cm de penetração no interior do elemento, apresenta uma força média de perfuração mais baixa que o restante da secção. Esta redução da força de perfuração é o parâmetro que indica o estado da madeira, permitindo a avaliação da secção residual em estado são da madeira.

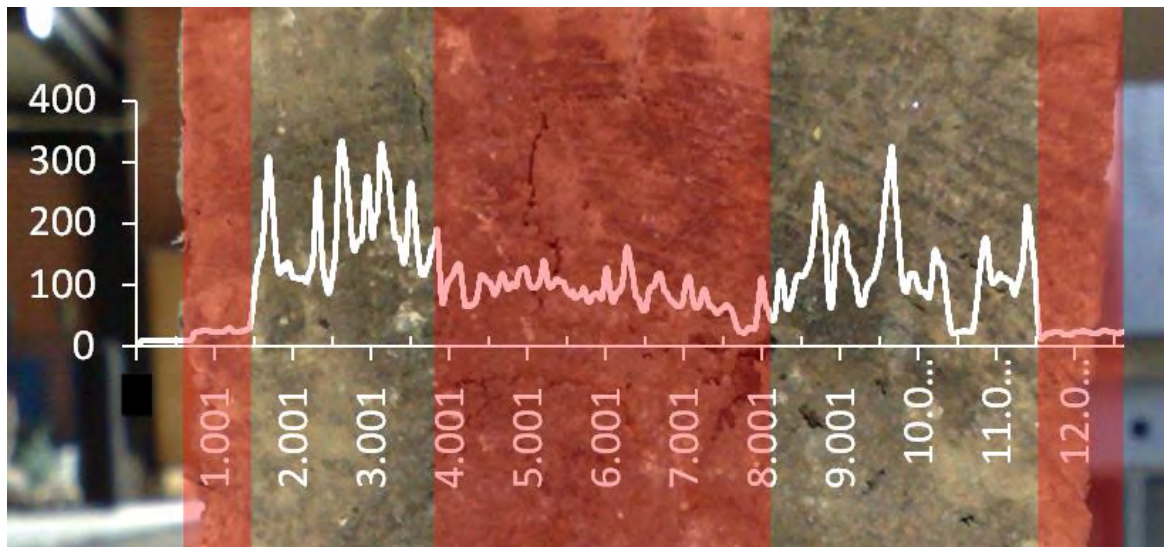


Figura 36 Secção avaliada e resultado do ensaio do Resistograph®

No caso do elemento estudado, esta redução deveu-se a uma anomalia com o nome de fenda anelar ou “casca de cebola” em que há a separação do lenho morto (menos resistente) do lenho vivo, originando assim a redução de resistência à perfuração. Esta anomalia fez prever possíveis problemas aquando o ensaio de carga, pois devido à separação do lenho morto existe uma forte possibilidade de a resistência ao corte nessa zona possa estar comprometida.

CAPÍTULO 6. PREPARAÇÃO DO ENSAIO

Previamente ao ensaio de carga, a asna foi sujeita a variados testes de carga, e foram estudadas várias hipóteses de se concretizar o ensaio. Foram estudados vários esquemas de ensaio, sistemas de actuação, sistemas de contraventamento, entre outros. Todo este processo de preparação foi um pouco moroso, mas torna-se essencial com vista à preparação do ensaio e melhor compreensão dos parâmetros a analisar.

6.1. ESQUEMAS E REPARAÇÕES

Previamente ao ensaio de carga, foram realizados bastantes trabalhos de preparação. Estes trabalhos começaram com a aplicação de um produto insecticida, com o intuito de preservar o mais possível a asna contra a acção dos agentes xilófagos. O produto utilizado foi o Xylophene[®], e o método de aplicação utilizado foi a pincelagem, tendo sido dadas três demãos do produto em todas as faces da asna.

O método de aplicação utilizado, não é o mais eficaz, uma vez que a profundidade de impregnação do produto está na ordem dos milímetros de profundidade. Devendo ser utilizado um método de injeção para que a profundidade fosse maior e o efeito do produto fosse o mais eficaz possível.

No âmbito da preparação do ensaio, foram discutidas algumas hipóteses para a realização do mesmo, sendo desenhadas cada uma dessas hipóteses em AutoCad 3D com vista a minimizar as surpresas e também a arranjar da melhor maneira o espaço a utilizar no laboratório do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.

Dentro das hipóteses estudadas, a escolha recaiu num esquema com recurso a actuadores de carga hidráulicos, que foram cedidos pelo Laboratório de Engenharia Sísmica e Estrutural da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Esta solução torna-se muito mais simples e económica em termos de espaço, uma vez que só necessitará de uma linha de furos da laje de reacção enquanto com outras soluções a área ocupada da laje de reacção seria superior.

Após ter sido escolhido o esquema de ensaio a utilizar, procedeu-se à concretização desse mesmo esquema em laboratório.

Para isso foram necessários trabalhos de carpintaria, tanto para reparar algumas zonas da asna que não estavam a exercer a função devida, como também para executar alguns elementos em madeira para que o ensaio pudesse ocorrer sem grandes complicações. Ao nível de reparações de elementos, foi necessário reparar a ligação entre a Perna esquerda e o Pendural principal, tendo sido mesmo preciso substituir uma secção de madeira para que a ligação funcionasse devidamente (Figura 37).



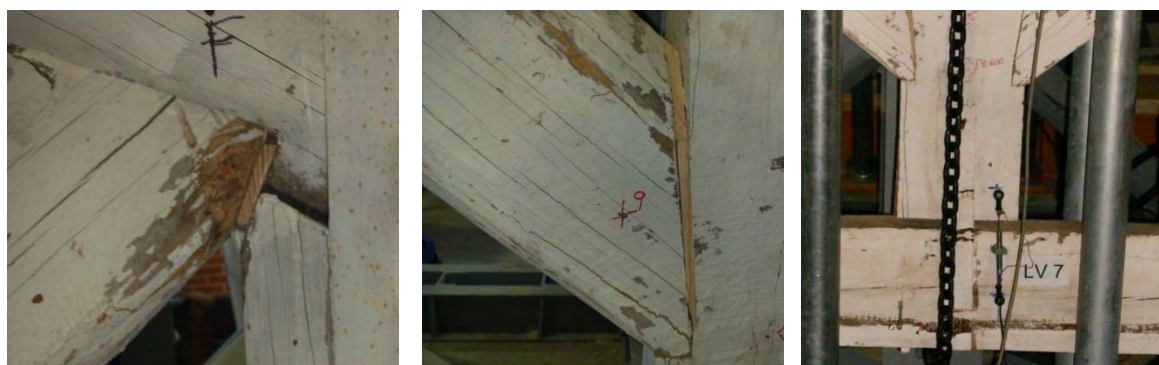
a) Ligação Perna-Pendural danificada

b) Extracção do segmento danificado

c) Substituição e reparação da ligação

Figura 37 Reparação da ligação Perna esquerda – Pendural

Outras reparações menos elaboradas foram também realizadas ao nível de outras ligações, ora procedendo-se ao seu enchimento ora à sua separação em função da sua necessidade (Figura 38).



a) Enchimento da ligação Escora-Perna

b) Enchimento da ligação Escora-Pendural

c) Separação da ligação Linha-Pendural

Figura 38 Reparação de ligações

Devido ao facto dos pontos de carga a utilizar necessitarem de ter alguma excentricidade em relação aos nós onde assentavam as madres da estrutura, foi ainda a execução de calços em madeira, de forma que os pontos de carga estivessem em concordância com os furos da laje de reacção. Estes calços servem também para que a força aplicada não seja tomada como uma força concentrada numa área bastante reduzida, o que originaria esmagamento localizado do elemento de madeira (Figura 39).



Figura 39 Calços para aplicação da carga

Esta excentricidade deve-se à discrepância existente entre a distância das madres da asna (2,1 a 2,2 m) e a distância entre os furos da laje de reacção (1m).

6.2. SISTEMA DE CONTRAVENTAMENTO

Um dos aspectos fulcrais do procedimento experimental é sem dúvida o do contraventamento da asna durante o ensaio de carga. A falta de contraventamento não só origina roturas para fora do plano da asna, por isso indesejáveis, como pode colocar em risco a segurança de pessoas necessárias à realização do ensaio.

Para o ensaio a realizar, foram pensados vários sistemas de contraventamento. A solução que à partida reunia melhores condições seria uma estrutura de pórticos metálicos. Como não existiam pórticos metálicos em número suficiente, foi necessário idealizar-se uma outra estrutura de contraventamento.

A solução escolhida para o sistema de contraventamento foi uma solução constituída por prumos metálicos de obra de grande porte. Os prumos usados são um pouco maiores que os prumos usados normalmente em obra (Tabela 8).

Tabela 8 Dimensões dos prumos utilizados

Denominação	Extensão máxima (m)	Diâmetro Externo x espessura (mm)	Diâmetro Interno x espessura (mm)
20-400	4	76 x 2	63,5 x 2,5
20-500	5	76 x 2,6	63,5 x 3,6

No sistema de contraventamento idealizado são utilizados 2 prumos 20-500 na vertical o mais próximo possível dos pontos de carga, e ligados a cada um destes prumos está outro prumo 20-400 fazendo reacção para um ponto exterior. No ponto de carga a meio vão foi reforçada a segurança, sendo colocados 4 prumos verticais, uma vez que é neste ponto em que se atingem maiores deslocamentos e maiores deformadas.



a) Contraventamento de um ponto de carga



b) Contraventamento a meio-vão

Figura 40 Sistema de contraventamento utilizado**Figura 41** Aspecto final da estrutura contraventada

No total, na execução de toda a estrutura de contraventamento foram necessários 12 prumos 20-500 na vertical e 12 prumos 20-400 na ortogonal, todos eles fornecidos pela empresa de materiais de construção BAUCOM.

6.3. SISTEMA DE ACTUAÇÃO

Como já foi referido anteriormente, o sistema de actuação utilizado foi um sistema com recurso a macacos hidráulicos. Para a realização do ensaio foram necessário 5 macacos hidráulicos, estes foram fixos à laje de reacção para que estes pudessem exercer uma força descendente aquando o ensaio de carga, fazendo por sua vez reacção contra a laje de reacção (Figura 42).



Figura 42 Macacos hidráulicos fixos na laje

Os macacos hidráulicos tinham a eles acoplados uma haste, e no topo dessa mesma haste estava ligada uma célula de carga que está ligada também a uma peça rotulada. Por sua vez, essa peça rotulada está ligada a uma manilha de alta resistência, esta manilha está conectada a 2 elos de ligação ligados a uma corrente que abraça a asna nos pontos de carga pretendidos (Figura 43).



Figura 43 Sistema de ligação correntes-macaco

No caso de a corrente ter um comprimento superior ao que se pretende, são utilizados ganchos de redução para que a corrente esteja mais esticada possível.

Para este ensaio foram escolhidas as correntes para o sistema de actuação, uma vez que quer os cabos de aço, quer as cintas em polyester apresentam grande deformação para esforços de tracção. Como o espaço livre entre a asna e a laje de reacção não era muito, optou-se pelas correntes metálicas pois a sua deformação é quase nula.

As peças utilizadas para o sistema de actuação têm as seguintes especificações:

Tabela 9 Especificações das peças do sistema de actuação

Peça		Tamanho	Carga de serviço (kg)
Corrente Grau 80		Elo nº 10	3150
Elos de ligação Grau 80		Elo nº 10	3150
Manilha de alta resistência		7/8 "	6500
Ganchos de redução		Elo nº 10	3150

Para a realização do ensaio foram necessários 35 metros de corrente grau 80 nº 10, 10 elos de ligação, 5 manilhas de alta resistência e 5 ganchos de redução.

CAPÍTULO 7. ENSAIO DE CARGA

O ensaio de carga da asna de madeira à escala real foi realizado no Laboratório do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro. O ensaio consiste num ensaio de carga cíclico e simétrico com incremento de força até a rotura do sistema estrutural.

7.1. PROCEDIMENTO DE CARGA

A asna de madeira foi ensaiada segundo um ensaio de carga cíclico de carga e descarga, onde foram utilizados cinco pontos de carga correspondendo cada ponto ao nó formado entre as Escoras e as Pernas, no caso do Pendural principal foi utilizado o ponto de cumeeira como ponto de carga, simulando os pontos onde assentariam as madres da cobertura. É importante relembrar que nos pontos correspondentes aos nós formados pelas Escoras e Pernas, o ponto de carga considerado tem alguma excentricidade em relação a esses nós (Figura 44).

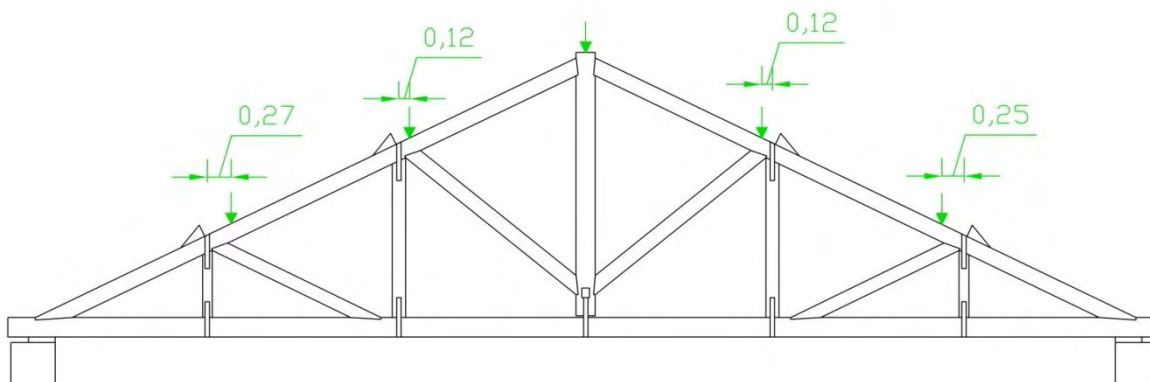


Figura 44 Excentricidade das cargas

O facto de existir essa excentricidade em relação aos nós, irá fazer com que as Pernas estejam sujeitas a esforços de flexão, o que poderá vir a afectar os resultados finais do ensaio.

Na Figura 45 onde estão representados diagramas de esforço flector, pode ver-se a diferença da resposta dada pela estrutura face a um carregamento sem excentricidade em relação aos nós Perna-Escora e a outro carregamento com excentricidade.

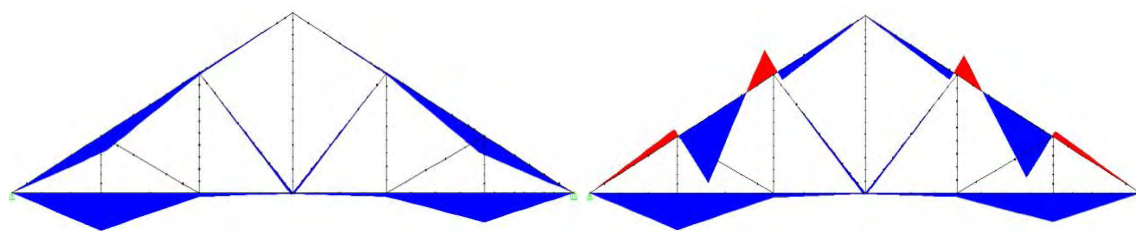


Figura 45 Carregamento Sem excentricidade vs Com excentricidade

Antes do início do ensaio de carga propriamente dito, foi feito um carregamento prévio, aproximadamente 6 kN, para que todos os elementos da asna se acomodassem uns aos outros para que não existissem movimentos livres por parte desses elementos aquando o ensaio de carga.

Após esta fase prévia iniciou-se então o carregamento com vista a rotura do material. Os ciclos de carregamento tiveram o seu início nos 6kN e de ciclo para ciclo houve um incremento de força na ordem dos 10 kN (exceptuando o 2º ciclo em que houve um incremento de 15 kN), quando se atingia o patamar pretendido em cada ciclo, efectuava-se a descarga até um valor de referência, que neste caso foi de 12kN. No ciclo que atingiria os 70 kN efectuou-se uma paragem no carregamento para que se pudesse efectuar o levantamento de danos até ao momento. Depois desta paragem, o ensaio retomou o seu rumo normal efectuando-se de novo os incrementos de 10 kN de ciclo para ciclo até que ocorresse a rotura do material, como se pode ver no Gráfico 1.

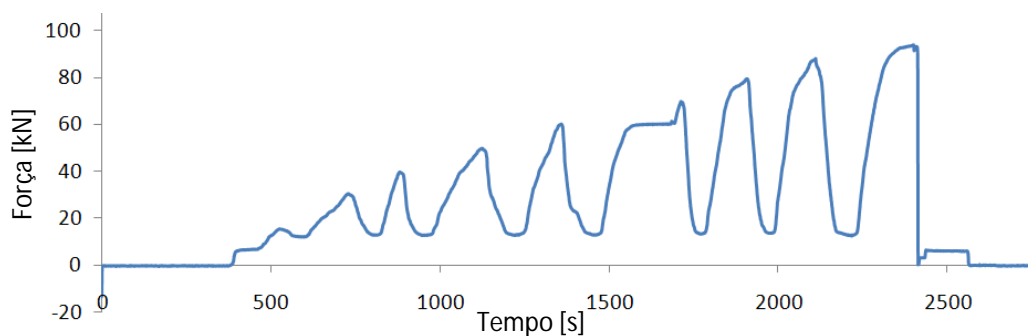


Gráfico 1 Procedimento de carga

Para levar a asna à rotura foram necessários 9 ciclos de força, demorando cerca de 1 hora, desde o pré-carregamento até se atingir o ponto de rotura.

7.2. INSTRUMENTAÇÃO

No decorrer do ensaio foram sendo medidos vários deslocamentos, tais como deslocamentos absolutos e relativos de alguns elementos da asna, assim como algumas rotações. Para medir esses deslocamentos foram necessários 18 transdutores medidores de deslocamentos. Na Figura 46 está representada toda a instrumentação utilizada.

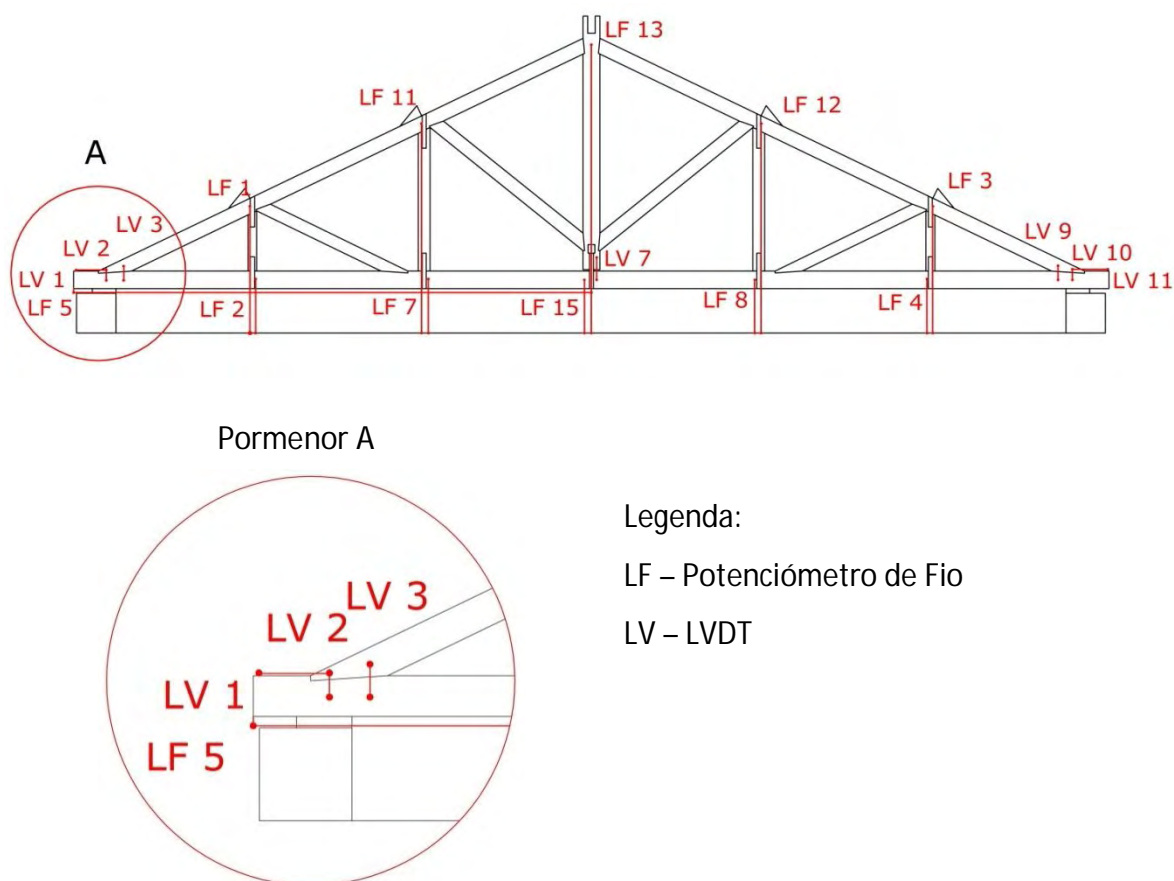


Figura 46 Esquema de toda a instrumentação utilizada

Os deslocamentos medidos foram sobretudo deslocamentos verticais absolutos dos pontos onde figuravam os nós da asna. Estes deslocamentos absolutos foram medidos através dos potenciômetros de fio que tinham um intervalo de medição maior (Figura 47).



Figura 47 Potenciômetro de Fio

As rotações e deslocamentos relativos, uma vez que são deslocamentos de menor escala, foram medidos com recurso a LVDT's. As rotações medidas são relativas às ligações Linha-Perna e foram obtidas indirectamente pelo deslocamento relativo de 2 pontos com um espaçamento pré-definido, como se pode ver na Figura 48.



Figura 48 LVDT's da ligação Linha-Perna

Para efectuar as medições de todos os deslocamentos foram necessários no total 18 transdutores, dos quais 10 eram potenciômetros de fio que mediram deslocamentos verticais absolutos, 1 era um potenciômetro de fio que mediu deslocamentos horizontais absolutos, 5 eram LVDT's que mediram deslocamentos verticais relativos e por fim havia também 2 LVDT's que mediram deslocamentos horizontais relativos.

7.3. RESULTADOS DO ENSAIO

7.3.1. Comportamento da estrutura

Através da análise do Gráfico 2, onde nos é dada a relação força-deslocamento no ponto da ligação Linha-Pendural, pode-se constatar o comportamento elástico-plástico da estrutura.

Aquando os ciclos de carga, a deformação aumenta até um determinado valor, quando é atingido o valor de força pretendido tem início o ciclo de descarga, em que a asna vai regressando ao seu estado de carga inicial. Devido ao seu comportamento elasto-plástico a deformação nesse momento não é a mesma que era aquando o início do ciclo de carga, sendo esta acrescida de uma deformação plástica que será irreversível para a asna, ou seja a estrutura não recuperou toda a deformação causada pelo carregamento. Isto acontece também devido ao facto de a madeira ser um material fibroso que vai perdendo resistência gradualmente evidenciando que a madeira resiste melhor para acções instantâneas.

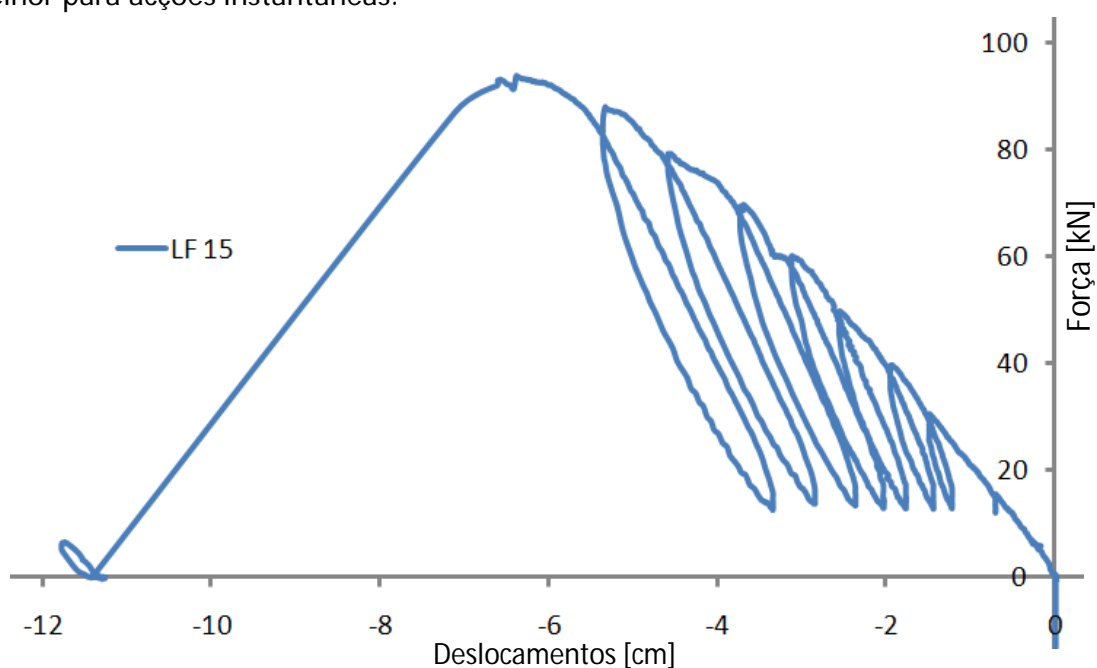
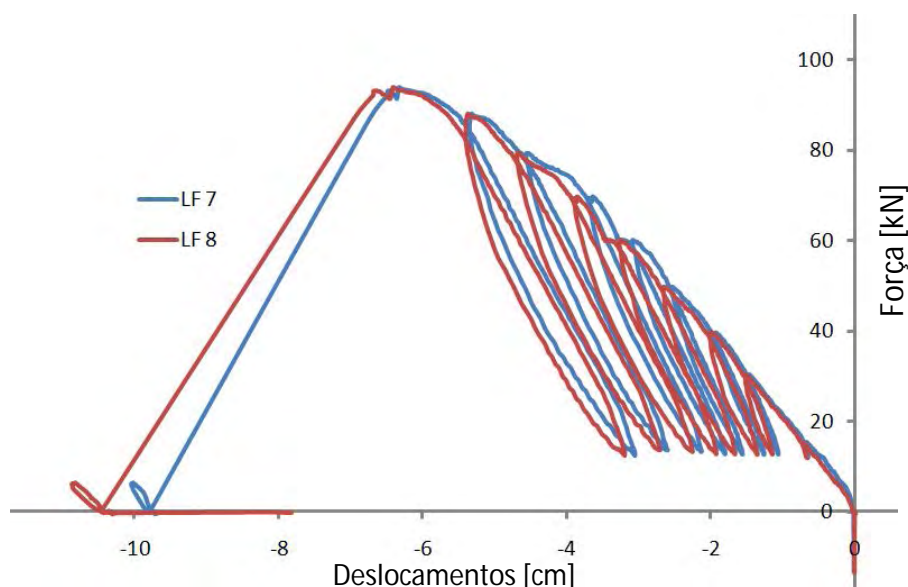
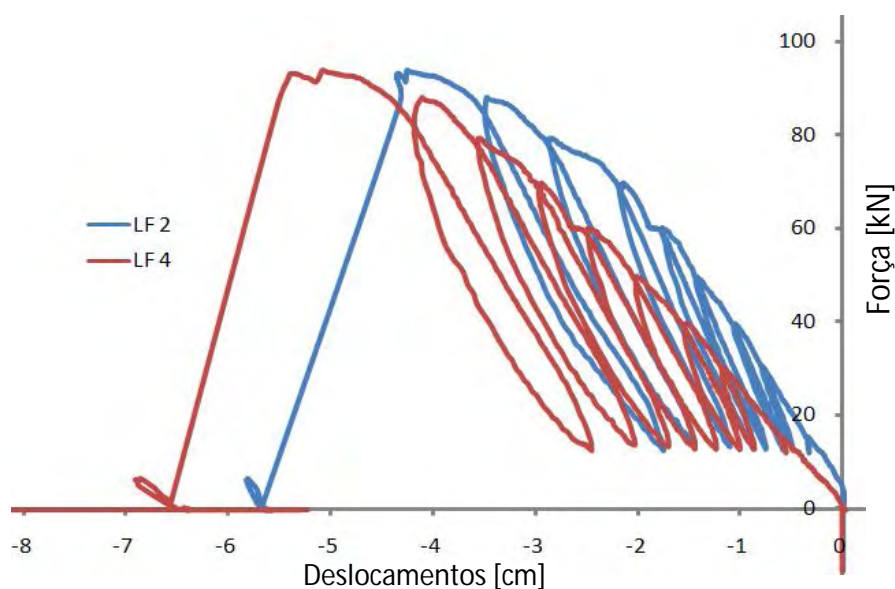


Gráfico 2 Relação Força-Deslocamento (LF 15)

Os gráficos relação força-deslocamento dos outros transdutores que mediram deslocamentos verticais globais têm todos aspecto idêntico, confirmando assim o regime elasto-plástico que foi seguido por toda a estrutura.

**Gráfico 3** Força-deslocamento LF7 e LF8**Gráfico 4** Força-deslocamento LF2 e LF4

Com a análise dos Gráficos 3 e 4 é visível que a resposta da asna ao carregamento foi uma resposta relativamente simétrica, uma vez que os deslocamentos verticais em pontos de posições simétricas da asna são aproximadamente os mesmos. Nos pontos de leitura dos transdutores LF2 e LF4 existe alguma diferença entre os valores lidos, havendo uma diferença de quase um centímetro na deformada final. Isto poderá dever-se ao facto de o lado direito da asna (LF 4) estar um pouco mais degradado do que o lado esquerdo (LF 2), apresentando assim uma deformada maior para o mesmo valor de carga aplicada. Este facto confirma plenamente os resultados obtidos com os ensaios

não destrutivos, onde os valores obtidos indicavam um maior estado de degradação do lado direito da asna.

A ligação entre a Linha e o Pendural principal, que era feita com recurso a uma chapa metálica que abraçava a Linha, teve um comportamento similar aos elementos de madeira, embora numa escala muito mais reduzida. Podendo dizer-se que teve o efeito pretendido, pois não permitiu que a Linha se deformasse mais gravosamente, permitindo apenas que se realizassem deslocamentos no sentido dos esforços de tracção, tendo sido lido um deslocamento relativo entre os dois elementos de 2,7mm (Gráfico 5).

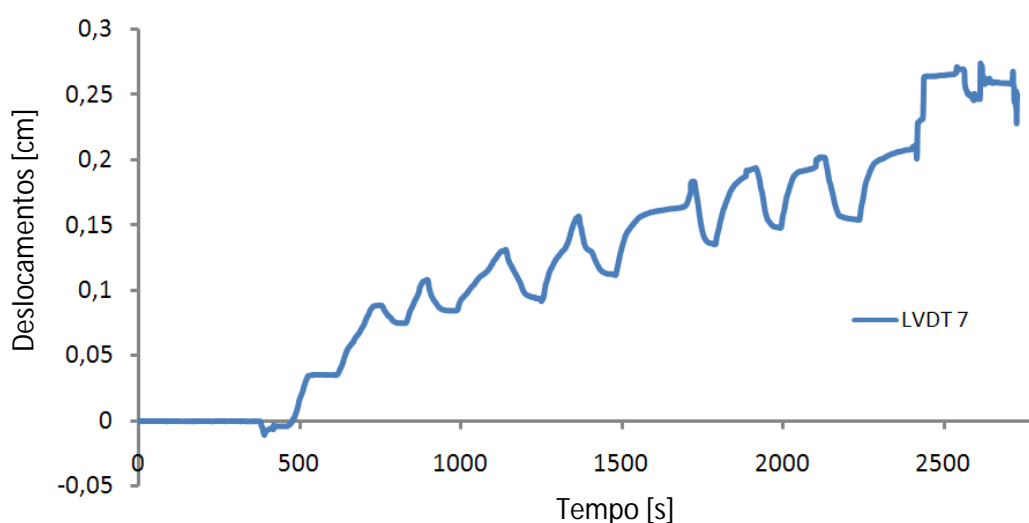


Gráfico 5 Deslocamentos relativos Linha-Pendural

Foram também registadas as rotações relativas entre as Pernas e as Linhas, e como era de esperar esta rotação teve como resultado um ângulo de amplitude negativa (no sentido de fechar a ligação), com um valor máximo de aproximadamente -1° (Gráfico 6).

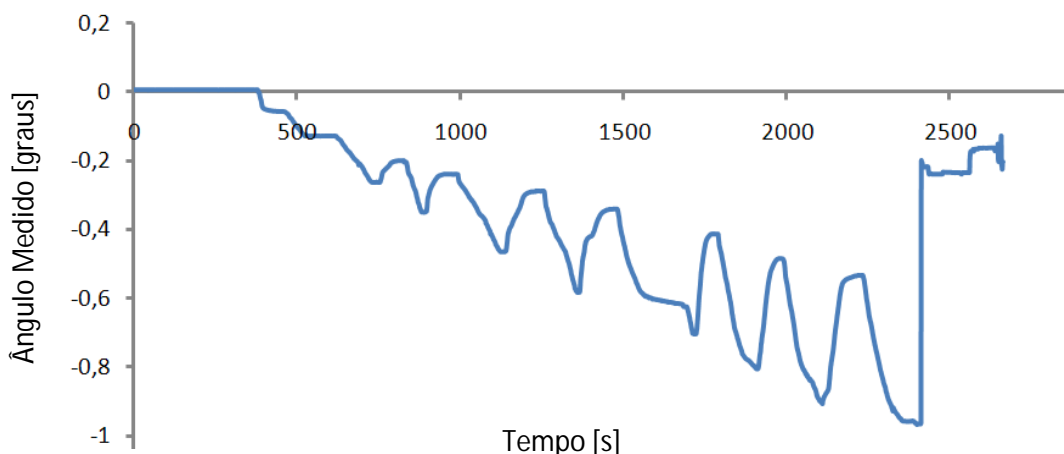


Gráfico 6 Rotação relativa, Linha-Perna esquerda

Com a análise do gráfico 6 pode ver-se também o comportamento de toda a estrutura, uma vez que em cada ciclo de carga a ligação ia fechando até atingir um valor máximo, quando se iniciava o ciclo de descarga, a ligação ia abrindo mas não chegava a atingir o ângulo de abertura que tinha no início do ciclo de carga.

Como a estrutura não foi amarrada nos pontos de apoio, para simular uma estrutura simplesmente apoiada, mediram-se também os deslocamentos horizontais que a asna sofreu ao longo do decorrer do ensaio (Gráfico 7).

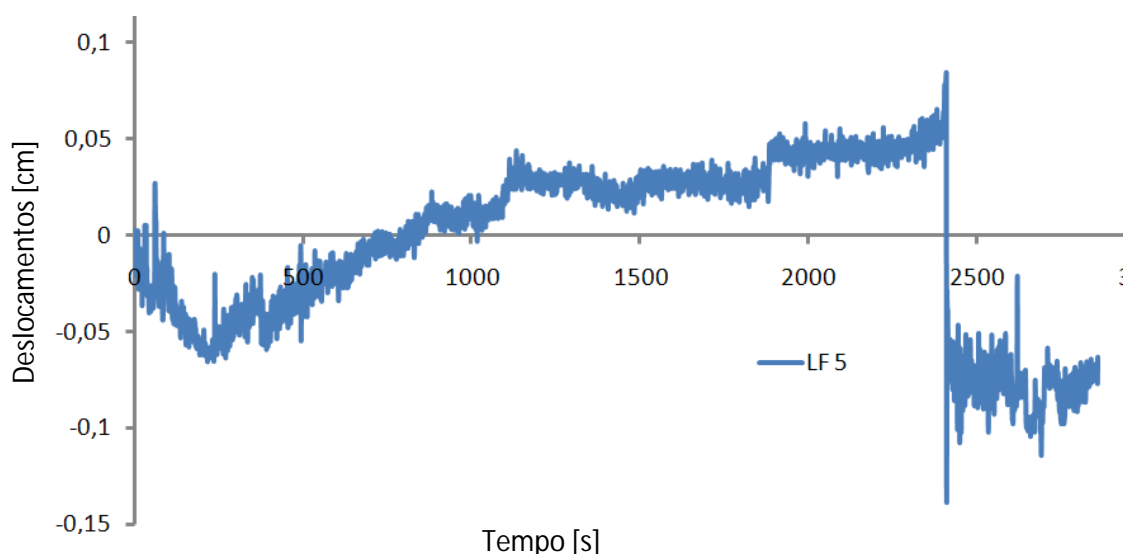


Gráfico 7 Deslocamento horizontal da asna

Da análise do Gráfico 7 constata-se que a asna não sofreu grandes deslocamentos horizontais, tendo como valor máximo um deslocamento de 1,3 mm da direita para a esquerda. Recorrendo aos LVDT's colocados na parte superior das ligações Perna-Linha da asna, foi possível monitorizar o deslocamento que a Perna tinha em relação à Linha da asna (Gráfico 8).

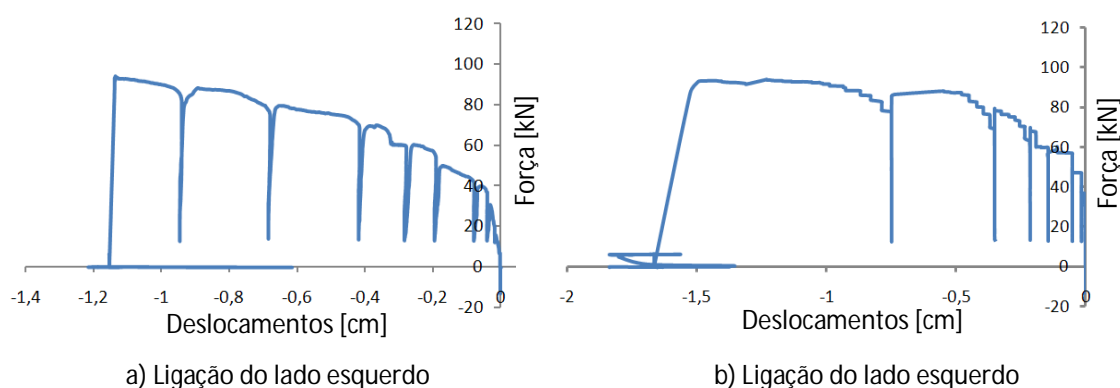


Gráfico 8 Deslocamentos relativos das ligações Pernas-Linha

Como se pode ver, a resposta das duas ligações Perna-Linha diferem bastante uma da outra. Na ligação da esquerda, pode-se ver que a resposta da madeira aos esforços de compressão que se faziam sentir, é uma resposta contínua. Enquanto a resposta da ligação do lado direito, não segue essa mesma continuidade, sendo uma resposta mais frágil. Esta diferença deve-se ao facto de a madeira da Linha do lado esquerdo estar num estado de conservação muito melhor em relação à do lado oposto.

O gráfico referente à ligação do lado esquerdo, mostra um deslocamento que se dá devido ao esmagamento da madeira da Perna e da Linha da asna. O gráfico referente à ligação do lado direito, mostra um deslocamento devido à separação fibras da madeira da Linha (rotura por corte paralelo ao fio). Esta antecipação da rotura de corte do lado direito deve-se ao facto da diferença de estados de degradação de uma e outra ligação. Existindo mesmo no lado direito da Linha (na zona da entrega) uma anomalia, denominada por fenda anelar ou “casca de cebola” (Figura 49), em que há a separação do lenho morto (menos resistente) do lenho vivo, reduzindo bastante a resistência ao corte dessa secção.

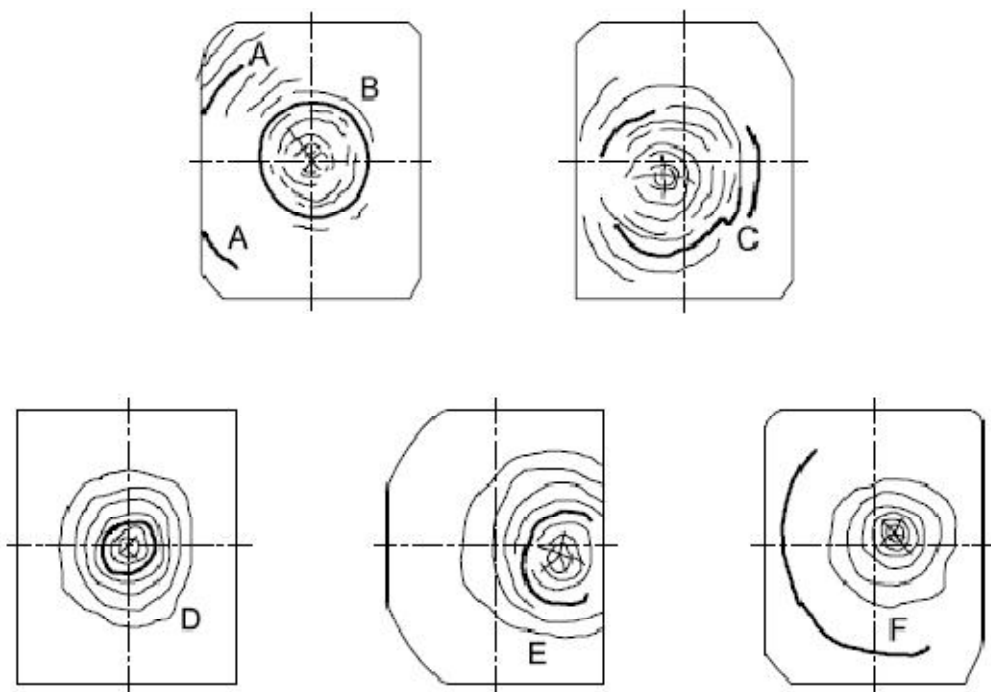


Figura 49 Anomalia fenda anelar [24]

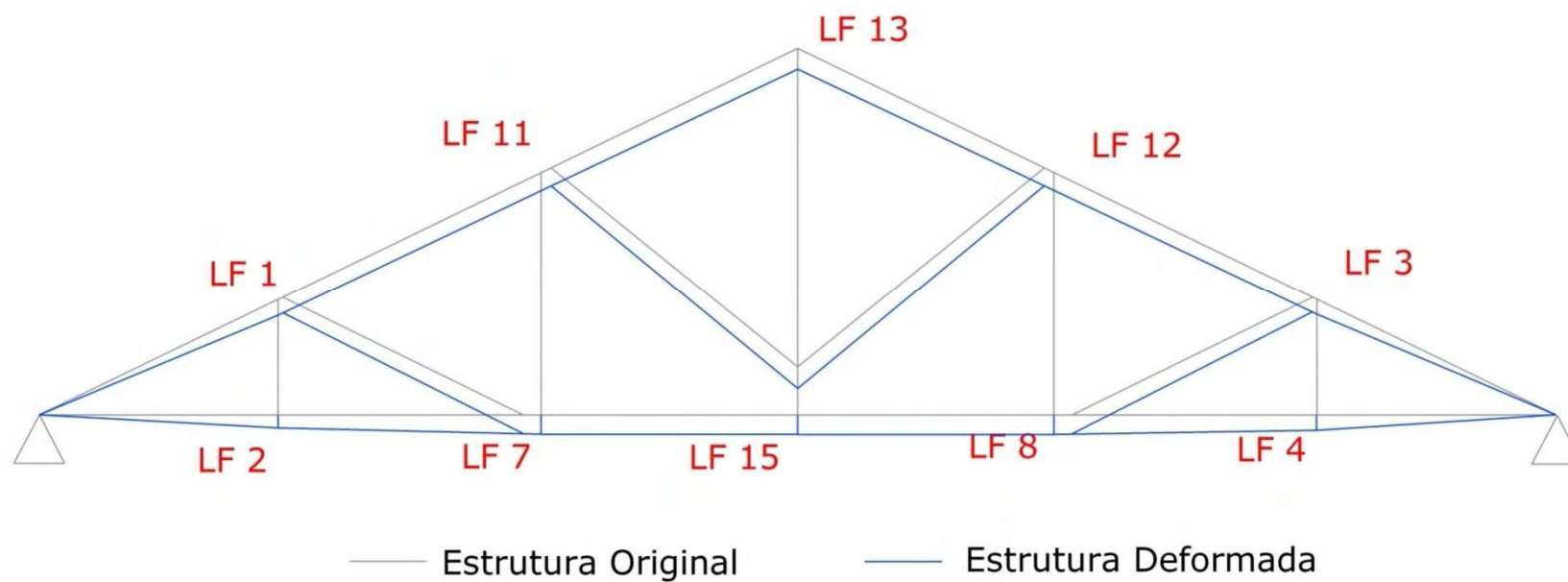
Essa anomalia reduz de tal forma a resistência ao corte da madeira, que na ligação Linha-Perna onde se deu a rotura da asna, a madeira dos dois elementos quase não sofreu nenhum dano devido ao esmagamento. A Figura 50 é bastante elucidativa, pois é notável o mau estado em que ficou a ligação, sem que houvesse grandes danos devido ao esmagamento como é visível no dente da Perna, que parece estar intacto.



Figura 50 Ligação Linha-Perna pós rotura

Tabela 10 Deslocamentos máximos medidos nos transdutores

Fx [kN]	LF 1 [mm]	LF 2 [mm]	LF 3 [mm]	LF 4 [mm]	LF 7 [mm]	LF 8 [mm]	LF 11 [mm]	LF 12 [mm]	LF 13 [mm]	LF 15 [mm]
93,986	51,91	42,62	54,26	50,85	63,28	64,19	58,76	58,54	60,81	63,85



** Na figura, os valores da deformada da asna foram ampliados 2 vezes de maneira a ser mais elucidativa.

7.3.2. Evolução dos danos

À medida que o ensaio decorria foram sendo levantados todos os danos que iam ocorrendo anotando-se todos os acontecimentos.

Nos dois primeiros ciclos de carga, que atingiram aproximadamente os 15 kN e os 30 kN de força máxima não foi detectado qualquer tipo de dano, nem se ouviu nenhum estalo com intensidade, para além dos estalos de acomodação de toda a estrutura.

No terceiro ciclo (40 kN), aproximadamente aos 38 kN de carga ouviram-se pela primeira vez, com alguma intensidade, estalos da madeira provenientes do lado esquerdo da asna, nomeadamente na ligação Perna esquerda-Linha, mas sem que fosse possível notar algum dano na asna ou sinais de esmagamento nas ligações.

Ao longo do quarto ciclo de carga (50 kN), a partir dos 35kN os estalos da madeira foram quase constantes e foram generalizados em toda a asna, contudo os danos ainda não tinham sido perceptíveis.

No quinto ciclo de carga (60 kN), começaram a fazer-se notar alguns danos ao nível da ligação Linha-Perna esquerda, notando-se algum esmagamento da madeira (Figura 51).

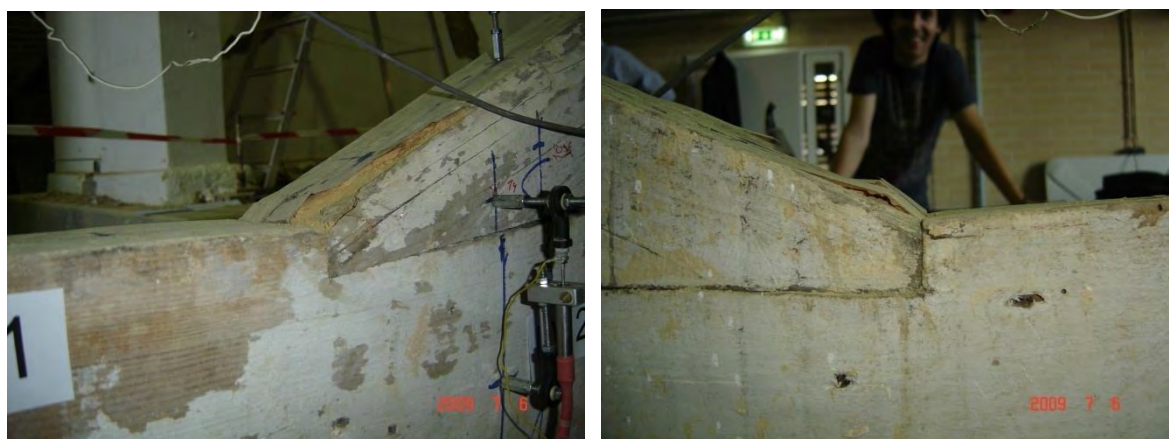
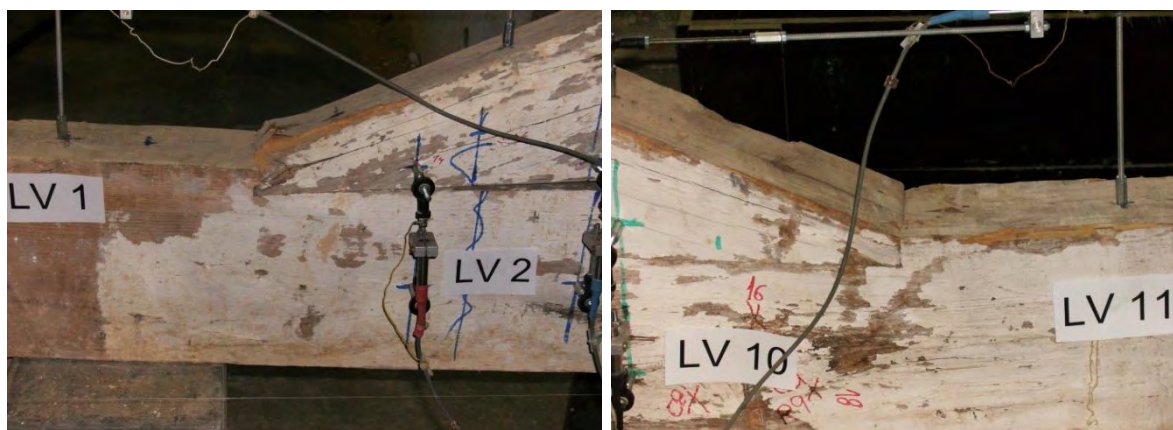


Figura 51 Esmagamento na ligação Linha-Perna Esquerda

Nos dois ciclos seguintes, que atingiriam os 70 e os 80 kN, respectivamente começou a notar-se algum esmagamento ao nível da ligação Linha-Perna direita, enquanto o esmagamento na ligação do lado oposto se agravava cada vez mais.



a) Intensificação do esmagamento na ligação do lado esquerdo

b) Início do esmagamento na ligação do lado direito

Figura 52 Evolução do esmagamento das ligações Linha-Perna

No oitavo ciclo (90 kN), houve a continuação e intensificação do esmagamento nas ligações Linha-Perna, até que aproximadamente aos 85 kN de força se ouviu com bastante intensidade um estalo proveniente da ligação Linha-Perna direita. Este estalo deveu-se à separação das fibras da madeira, esta separação deu origem a um pequeno deslize das fibras (Figura 53). A separação das fibras fez com que a capacidade de resistência ao corte da madeira naquela zona tivesse uma redução significativa, dando-nos assim um sinal de que a rotura do material estaria próxima.



Figura 53 Separação e deslize das fibras

No último ciclo de força, que atingiria os 100 kN de força, tal como tinha sido previsto, ocorreu a rotura do material por corte ao nível da ligação Linha-Perna direita.

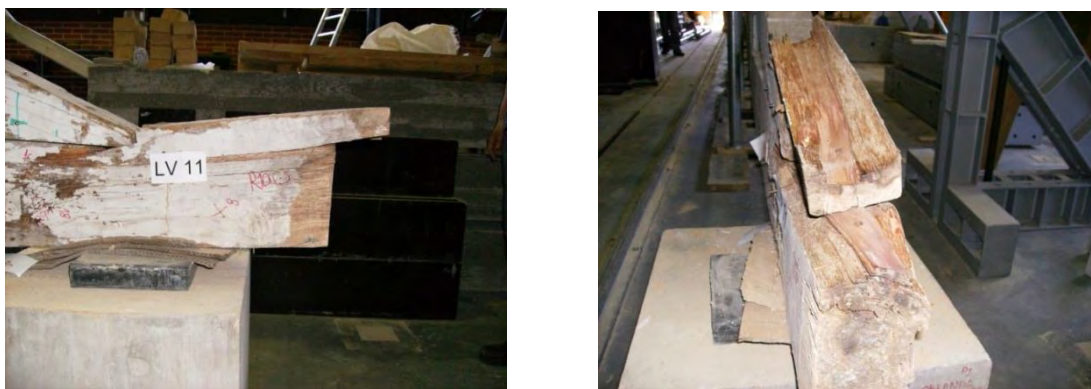


Figura 54 Rotura devido ao esforço de corte

Esta rotura por corte deu origem ao deslizamento das fibras de aproximadamente 9 cm para a direita. Outro dano que se fez notar aquando da rotura, foi o arrancamento da Escora principal do lado direito na ligação Escora-Linha (Figura 55).



Figura 55 Separação da ligação Linha-Escora

Este dano deveu-se ao facto de a Perna ter acompanhado o deslizamento que ocorreu na ligação Perna-Linha. Como a Escora estava também ligada à Perna, esta permaneceu ligada à Perna desprendendo-se assim da Linha. Por essa mesma razão, todo o lado direito da estrutura sofreu danos ao nível de quase todas as ligações. Existindo zonas em que os elementos verticais sofreram deslocamentos para a direita, como é o caso do Pendural principal que sofreu um deslocamento de cerca de 3 cm para a direita e existindo outras zonas em que ocorreu a inclinação de elementos verticais, tais como o Pendural secundário e terciário (Figura 56).



Figura 56 Inclinação de elementos verticais e deslocamento de elementos

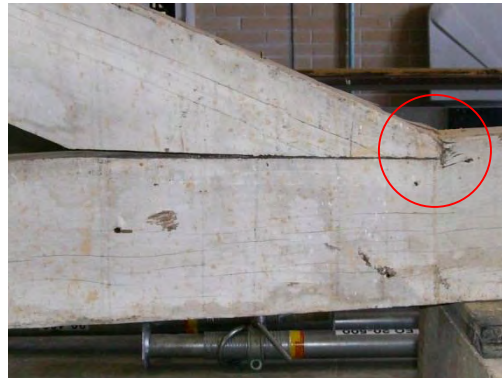
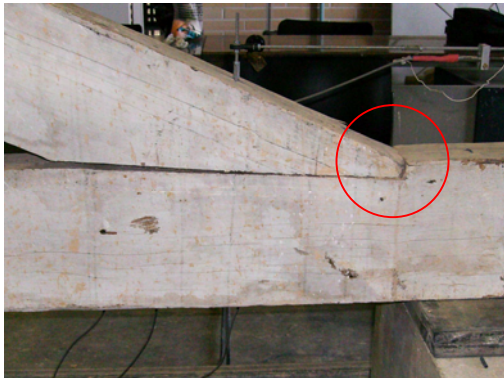
7.3.3. Antes e Após

De maneira a melhor perceber e a resumir todos os danos que o ensaio de carga teve na asna, foi elaborada uma tabela onde são apresentadas imagens de várias secções da asna antes do e após o ensaio. Estas imagens incidem mais nas zonas das ligações, pois foi nessas zonas onde se notaram mais deformações e mais danos com o decorrer do ensaio.

Tabela 11 Antes e após o ensaio de carga

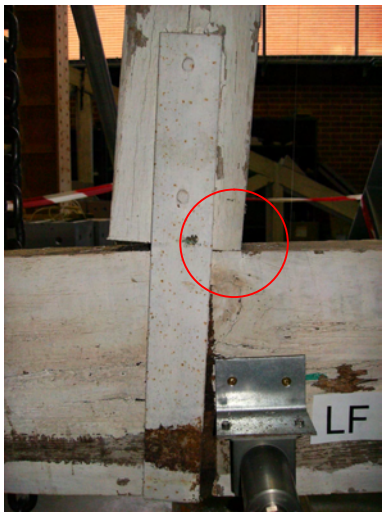
Antes

Após



Antes

Após



CAPÍTULO 8. MODELAÇÃO NUMÉRICA

Depois de feito todo o trabalho de laboratório, tornou-se importante a realização de um modelo numérico da asna ensaiada, de maneira a melhor perceber o seu comportamento e também de modo a obter um termo de comparação para com o ensaio realizado.

Para a modelação numérica da asna, foi utilizado o programa de análise estrutural SAP2000 v11.0.4 [29].

8.1. MODELAÇÃO DA ASNA

Para a realização do modelo numérico da asna, em primeiro foi necessário definir as propriedades materiais. A madeira foi considerada como um material ortotrópico e as propriedades mecânicas utilizadas tiveram como base nos valores fornecidos na Ficha M2 do LNEC para pinho bravo usado em estruturas [23].

Tabela 12 Propriedade Mecânicas do Pinho Bravo [23]

Propriedades Mecânicas		
Flexão estática (N/mm^2)	$f_{m,k}$	35
Tracção paralela às fibras (N/mm^2)	$F_{t,0,k}$	21
Tracção perpendicular às fibras (N/mm^2)	$F_{t,90,k}$	0,49
Compressão paralela às fibras (N/mm^2)	$F_{c,0,k}$	24,7
Compressão perpendicular às fibras (N/mm^2)	$F_{c,90,k}$	7,3
Corte (N/mm^2)	$F_{v,k}$	3,4
Módulo de elasticidade (kN/mm^2)		
Paralelo às fibras		
(valor médio)	E_0	14
(valor característico)	$E_{0,05}$	9,38
Perpendicular às fibras (valor médio)	E_{90}	0,46
Módulo de distorção (kN/mm^2)	G	0,87

Depois de definido o material, procedeu-se ao desenho da estrutura incluindo a geometria da asna e secções transversais de cada um dos seus elementos constituintes. As secções transversais atribuídas a cada elemento tiveram como base os resultados do Pilodyn®, onde foi assumido que para uma penetração inferior ou igual a 6 mm a madeira encontrava-se em estado são e a secção utilizada seria a secção medida com a régua. Para valores de penetração do Pilodyn® superior a 6 mm, a medida efectuada com a régua era reduzida em todas as faces pelo valor da diferença do valor lido no Pilodyn com o valor de referência (6mm). Por exemplo, num determinado elemento de secção 200x100, a medida de penetração do Pilodyn® é de 22mm, logo a secção assumida para esse elemento será de 184x84.

Na Figura 57, pode-se ver a asna modelada no SAP onde se fazem notar as diferentes secções utilizadas de acordo com as medições obtidas com o Pilodyn®.

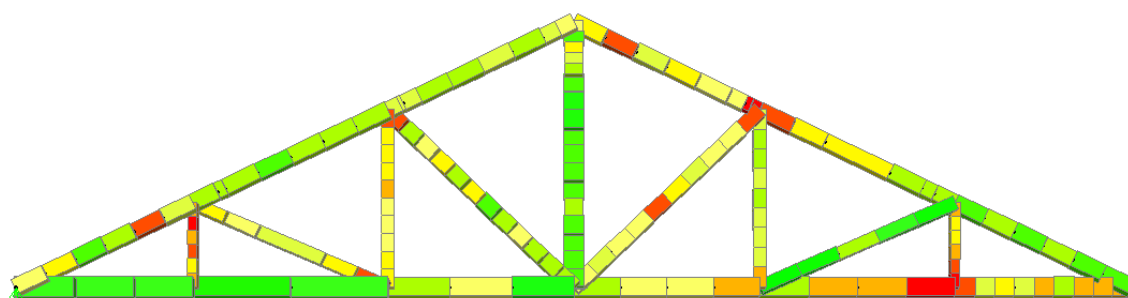


Figura 57 Asna modelada com secções diferenciadas

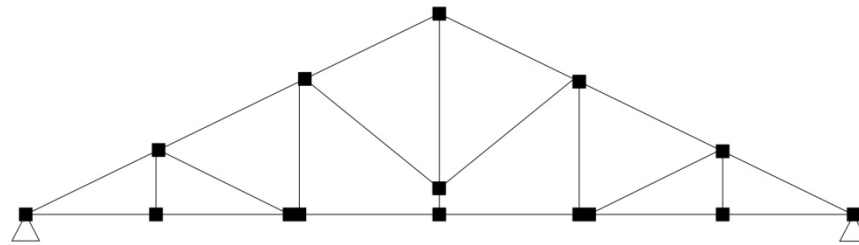
Como já foi dito no Capítulo 5, os elementos a verde foram os que tiveram valores de penetração mais baixos, enquanto os elementos a vermelho são os que tiveram valores de penetração mais elevados.

8.2. EFEITO DA RIGIDEZ DAS LIGAÇÕES

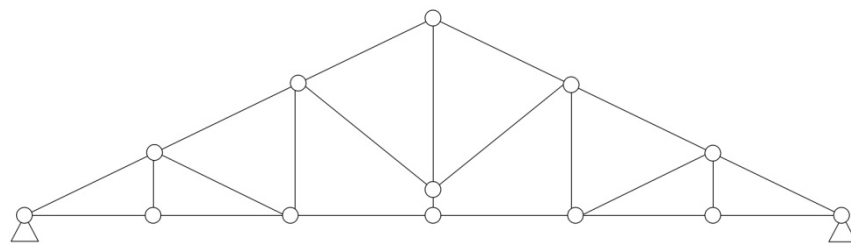
De modo a melhor entender o efeito da rigidez das ligações em toda a estrutura, foram realizados vários modelos numéricos que diferiam entre si apenas no modo em que as suas ligações eram executadas.

Num dos modelos foram consideradas ligações rígidas, enquanto no outro foram consideradas ligações com um comportamento completamente oposto, sendo utilizadas

para este caso ligações reticuladas. É de referir que estes dois tipos de ligações, são as que normalmente se utilizam para efeitos de cálculo, obtendo-se resultados bastante díspares para um e outro caso.



a) Sistema Rígido



b) Sistema Reticulado

Figura 58 Ligações Modeladas

De maneira a simplificar as comparações, foi tomado como ponto de referência o ponto lido pelo transdutor de fio LF15, correspondendo ao ponto da Linha a meio vão (onde se verificam as maiores deformadas).

Através da análise do Gráfico 9, pode ver-se perfeitamente a diferença de grandeza da deformada obtida para os 2 tipos de ligações. Sendo que, para o sistema rígido o deslocamento máximo do ponto em causa é de somente 1,26 cm, enquanto para o sistema reticulado o deslocamento do mesmo ponto é de 61,1 cm (cerca de 50 vezes superior). Através do Gráfico 9 é possível constatar também, que a situação real se encontra numa situação intermédia em relação aos sistemas reticular e rígido, sendo o deslocamento máximo medido de 6,38 cm.

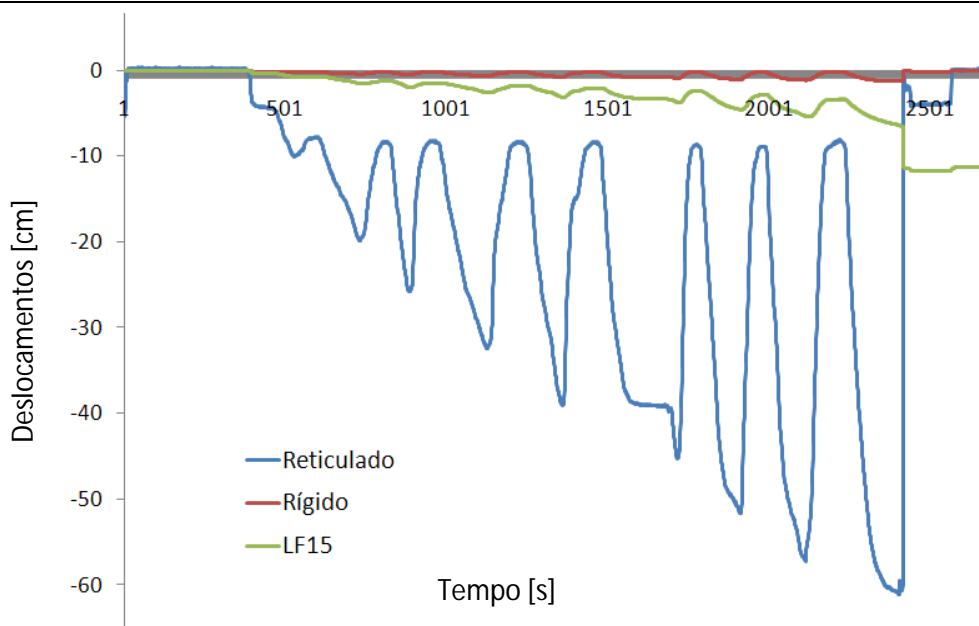


Gráfico 9 Sistema Real vs Reticulado vs Rígido

Analisando o Gráfico 10, relativo à análise dos deslocamentos sofridos ao nível da ligação Linha-Pendural principal (LVDT 7) pode constatar-se o seu comportamento real. A avaliação do comportamento dessa ligação torna-se mais fácil com o auxílio de uma linha de tendência (a vermelho), pois através da qual podemos constatar o comportamento não-linear da ligação, já que de um ciclo para o outro a ligação vai acumulando danos significativos, não recuperando totalmente as deformadas máximas de cada ciclo. Este facto indica-nos de uma forma clara, que as ligações de uma asna de madeira são dotadas de alguma rigidez.

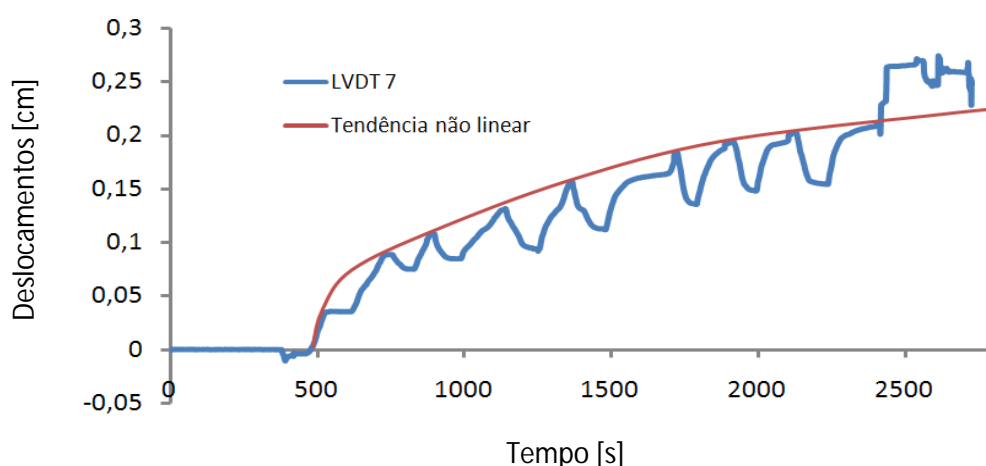


Gráfico 10 Comportamento da ligação Linha-Pendural

Tendo em conta estes resultados pode então dizer-se, que na realidade as ligações de uma asna têm um comportamento que não é rígido nem reticular, mas sim um comportamento intermédio, podendo dizer-se que têm um comportamento semi-rígido.

8.3. MODELAÇÃO DAS LIGAÇÕES

Tendo em conta o que foi dito anteriormente, as ligações da asna em causa têm que ser consideradas semi-rígidas para que a modelação numérica se aproxime o mais possível do ensaio efectuado em Laboratório.

Para que fosse possível atribuir essa semi-rigidez no modelo numérico, tiveram que ser utilizadas ligações não-lineares, NNLINKS. De maneira a reproduzir de melhor forma o comportamento semi-rígido das ligações, foi necessário primeiramente calcular a rigidez axial de cada NNLINK, esta rigidez varia de ligação para ligação, pois depende da geometria da própria ligação, geometria dos elementos a ligar e também das características mecânicas da madeira.

A rigidez axial dos NNLINKS para as ligações sujeitas a esforços de compressão (ligação Perna-Linha, Escora-Linha, Escora-Perna, Perna-Pendural e Escora-Pendural) pode ser calculada através da seguinte fórmula,

$$k_{\alpha x} = \frac{E_{\alpha} S}{l} \quad (32)$$

Onde se aplica a fórmula de Hankinson,

$$E_{\alpha} = \frac{E_0}{\cos^2 \alpha + \frac{E_0}{E_{90}} \sin^2 \alpha} \quad (33)$$

Em que l e S são parâmetros geométricos que se podem ver na Figura 59, onde S é a área formada pelo parâmetro s multiplicada pela largura do elemento, b .

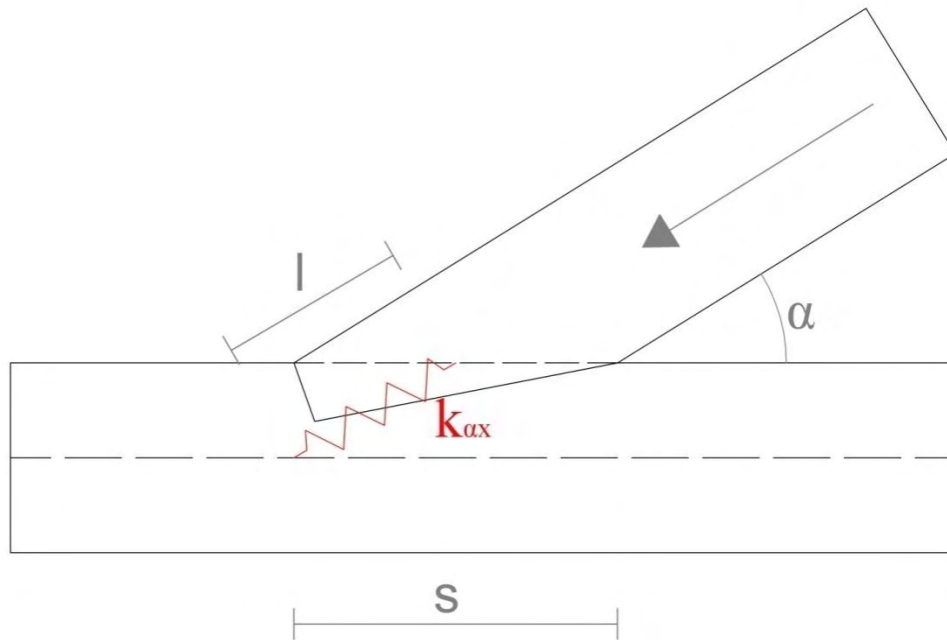


Figura 59 Esquema para o cálculo da rigidez axial [30]

Para as ligações sujeitas à tracção (ligações Linha-Pendurais e Perna-Pendurais secundários e terciários), onde existem peças metálicas, a rigidez axial destas ligações pode ser calculada da seguinte forma:

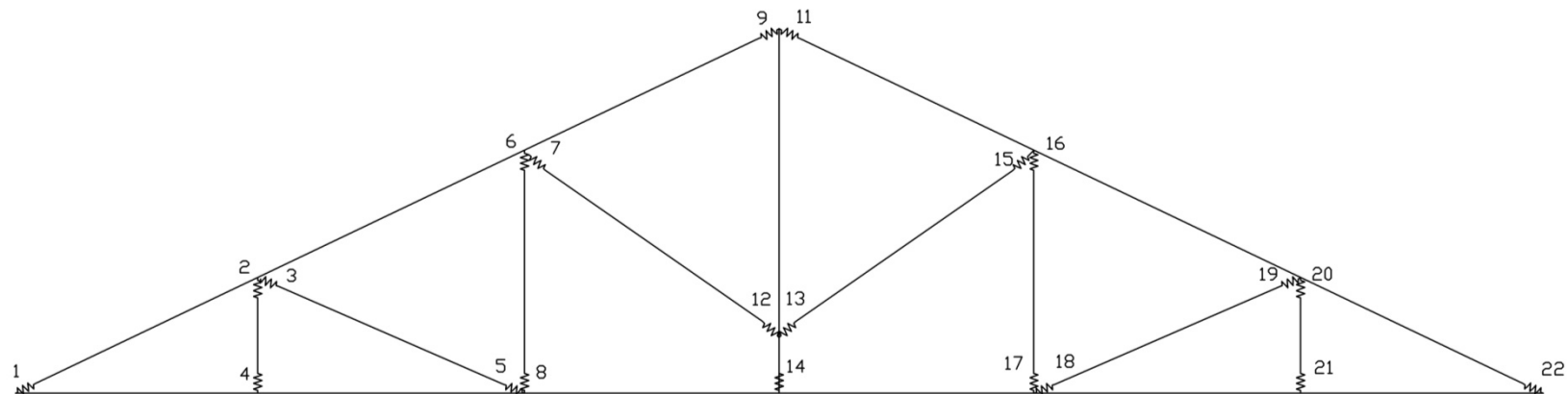
$$k_{ax,pm} = \frac{E_{peça\ metálica} A_{peça\ metálica}}{l_{peça\ metálica}} \quad (34)$$

Onde $E_{peça\ metálica}$, representa o módulo de Elasticidade do aço, enquanto $A_{peça\ metálica}$ e $l_{peça\ metálica}$ representam a secção da peça metálica e o seu comprimento, respectivamente.

Como a resposta da estrutura foi uma resposta simétrica, a rigidez rotacional a atribuir às ligações não é relevante, podendo não ser consideradas essas rigidezes para se obterem resultados satisfatórios.

Tabela 13 Valores de rigidez teórica para cada NNLINK

Rigidez de cálculo [kN/m]	NNlink										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	11	12
Axial	378579,6	24277,46	107681,2	22580,65	227652,5	23204,42	96752,87	21761,66	86926,08	84327,74	116990,4
Corte	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞
Rotação	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	
Axial	108747,5	20095,69	91915,23	24852,07	23204,42	263743,8	113379	24000	22702,7	411499,5	
Corte	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	
Rotação	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	



8.4. CALIBRAÇÃO DO MODELO

Com base na informação recolhida do ensaio de carga, nomeadamente através da monitorização da ligação Linha-Pendural principal, foi possível calibrar essa mesma ligação com um detalhe superior. Tendo sido conseguido modelar essa ligação de modo a que esta seguisse um comportamento não-linear.

Para este efeito foram utilizadas NNLINKS com um comportamento histerético de *Takeda* (fornecidos pelo software SAP2000 [29]).

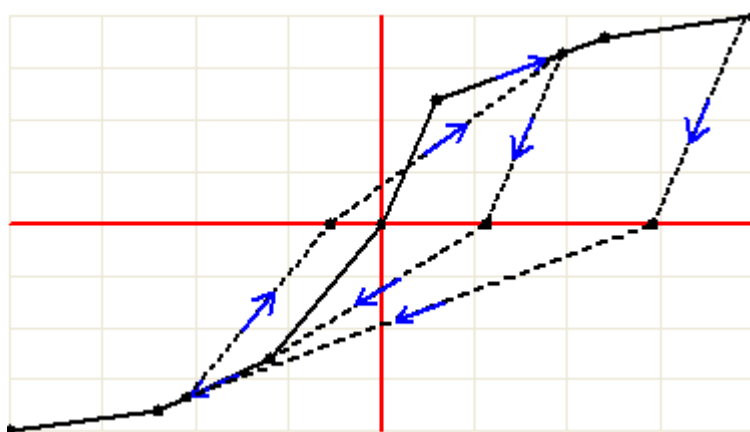


Figura 60 Função para o comportamento não-linear (*Takeda*) [29]

Com os dados obtidos a partir do ensaio de carga, é possível determinar os pontos da função de *Takeda* presente na Figura 60, fazendo assim com que o comportamento da ligação modelada seja mais aproximado do seu comportamento real, tal como se pode ver no Gráfico 11.

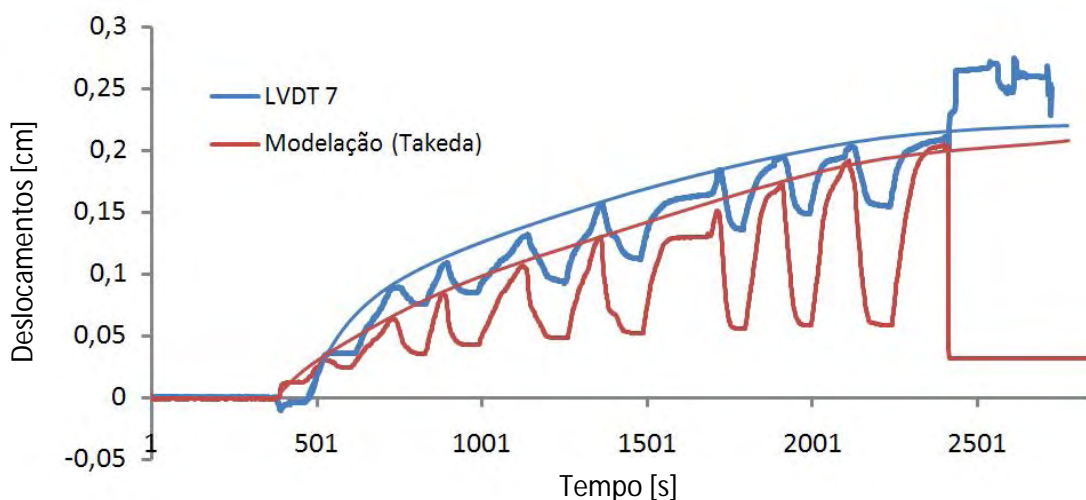


Gráfico 11 Comportamento não linear real (LVDT 7) vs modelação (NNLINK 14)

Infelizmente neste trabalho, a ligação Linha-Pendural principal foi a única a ser monitorizada para deslocamentos axiais, tornando-se assim impossível calibrar todo o modelo de modo a reproduzir o comportamento elasto-plástico da estrutura, sendo feita apenas a calibração das rigidezes das ligações, de maneira a que a deformada máxima da estrutura modelada seja mais próxima possível da deformada máxima obtida no ensaio de carga.

Depois de terem sido calculadas as rigidezes teóricas de cada>NNLINK, foram verificados os deslocamentos obtidos e comparados com os resultados provenientes do ensaio de carga (Gráfico 12).

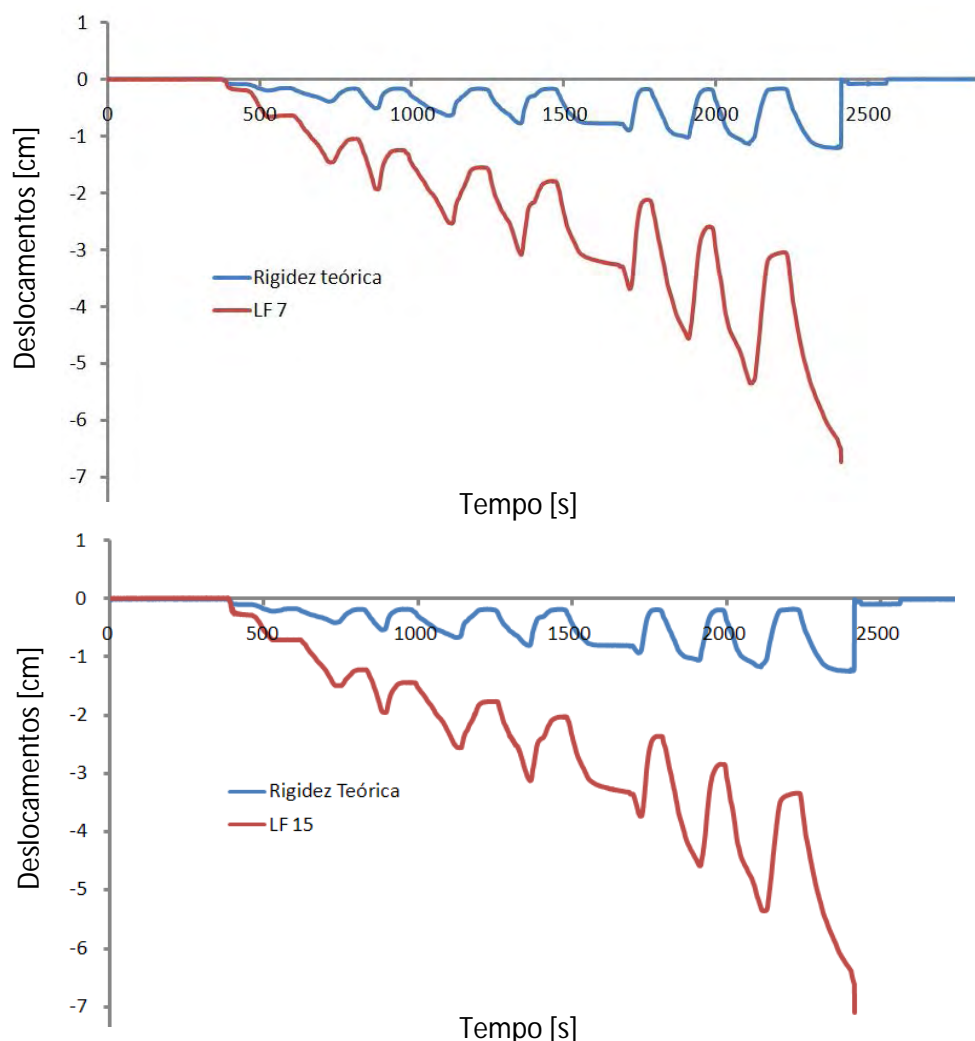


Gráfico 12 Rigidez teórica vs Ensaio de carga (LF 7 e LF 15)

Como se pode constatar pelo Gráfico 12, a deformada máxima para os valores de rigidez teóricos fica bastante aquém dos resultados do ensaio, sendo necessário efectuar a calibração através da diminuição das rigidezes das ligações, de maneira a que a

estrutura modelada se deformasse mais gravosamente e se aproximasse mais da deformada real.

Este facto foi geral para todos os pontos monitorizados no ensaio, tendo que se efectuar a diminuição das rigidezes em todas as ligações da asna. A calibração de todo o modelo foi um processo iterativo e algo moroso até se encontrarem os valores certos para que as deformadas fossem o mais próximo possíveis.

A Tabela 14 mostra uma boa adequação dos resultados obtidos numericamente com os resultados experimentais, visto que o erro obtido é inferior a 15% para todos os transdutores.

Tabela 14 Resultados experimentais (Ensaio) vs numéricos (Mod.) [cm]

LF 1		LF 2		LF 3		LF 4		LF 7	
Ensaio	Mod.	Ensaio	Mod.	Ensaio	Mod.	Ensaio	Mod.	Ensaio	Mod.
5,18	4,64	4,25	3,64	5,41	4,74	5,07	4,65	6,32	6,13
Erro = 10,51%		Erro = 14,46%		Erro = 12,33%		Erro = 8,29%		Erro = 3,00 %	
LF 8		LF 11		LF 12		LF 13		LF 15	
Ensaio	Mod.	Ensaio	Mod.	Ensaio	Mod.	Ensaio	Mod.	Ensaio	Mod.
6,41	7,01	5,87	5,45	5,85	5,55	6,08	5,71	6,38	6,89
Erro = 9,34%		Erro = 7,16%		Erro = 5,16%		Erro = 6,25%		Erro = 8,26%	

Os valores de rigidezes que se tiveram que utilizar para efectuar a calibração (Tabela 15) foram bastante mais reduzidos em relação ao valor teórico calculado. Isto poderá dever-se ao facto de grande parte das ligações se encontrar com algumas folgas, estas folgas poderão dever-se sobretudo ao mau transporte e colocação da asna, que resultou numa inversão de esforços provocando assim folgas significativas nas ligações, mas também devido aos elementos constituintes da asna, nas suas extremidades (zona onde se realizam as ligações) estarem mais deteriorados, diminuído assim bastante a rigidez dessas mesmas ligações (reduzindo em alguns casos para cerca de 80% do valor teórico calculado).

Tabela 15 Valores de rigidez (axial) após calibração

Rigidez calibrada [kN/m]	NNlink					
	1	2	3	4	5	6
Axial	69500	4400	10500	4300	30500	4300
	7	8	9	11	12	13
Axial	17000	4000	15500	15000	23000	21000
	14	15	16	17	18	19
Axial	15000	12000	4800	4400	37500	14500
	20	21	22			
Axial	4200	4700	39000			

8.5. CÁLCULO DA FORÇA MÁXIMA

Depois de calibrado e finalizado o modelo numérico da asna em estudo, pode-se efectuar o estudo de todos os esforços que se fizeram sentir nos elementos da asna, podendo consequentemente determinar a força que seria necessária para que houvesse rotura em condições de madeira totalmente sã.

Todos estes cálculos têm em conta as equações enunciadas no Capítulo 3.

8.5.1. Verificação da ligação Linha-Perna

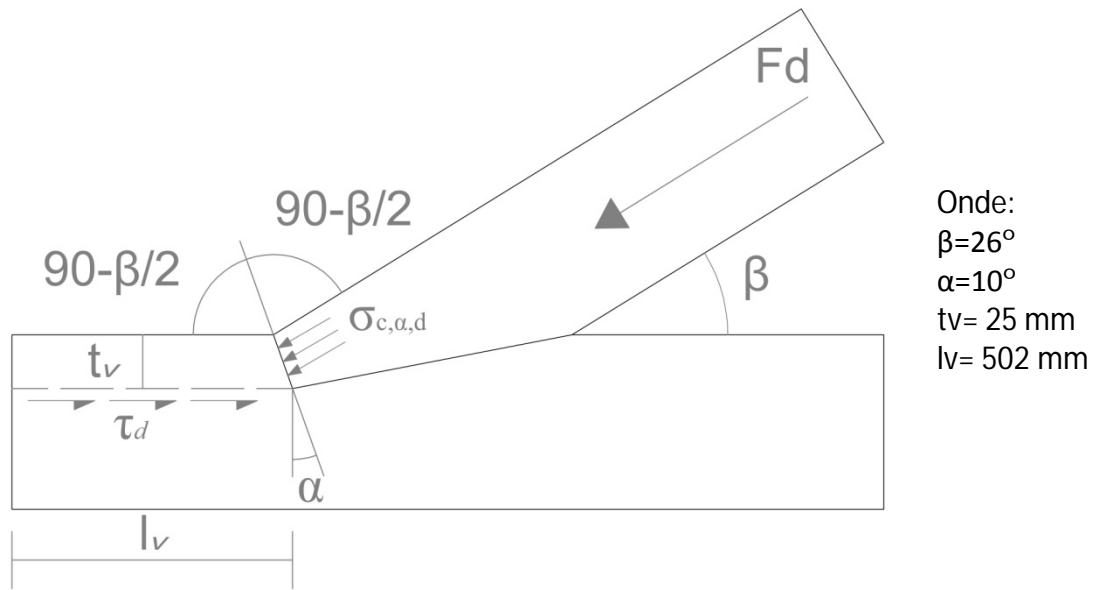


Figura 61 Esforços na ligação Linha-Perna

Verificação ao Esmagamento

Segundo a equação 25 do Capítulo 3, a verificação ao esmagamento é feita da seguinte forma:

$$\sigma_{c, \alpha, d} \leq \frac{f_{c, 0, d}}{\frac{f_{c, 0, d}}{f_{c, 90, d}} \cdot \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} \quad (35)$$

$$\frac{F_d \cdot \cos^2\left(\frac{\beta}{2}\right)}{b_{ef} \cdot t_v} \leq \frac{f_{c, 0, d}}{\frac{f_{c, 0, d}}{f_{c, 90, d}} \cdot \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} \Leftrightarrow \frac{F_d \cdot \cos^2\left(\frac{26}{2}\right)}{100 \cdot 25} \leq \frac{20,9}{\frac{20,9}{6,17} \cdot \sin^2(10) + \cos^2(10)} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow F_d \leq 51.34 \text{ kN} \quad (36)$$

Isto quer dizer que a ligação Linha-Perna a partir de um esforço de compressão igual ou superior a 51,34 kN começará a esmagar, este esforço faz corresponder a uma carga global de 45 kN.

Verificação ao Corte paralelo ao fio

Segundo a equação 29 do Capítulo 3, a verificação ao esmagamento é feita da seguinte forma:

$$\tau_d \leq f_{v,d} \quad (37)$$

$$\frac{Fd \cdot \cos^2(26/2)}{100 \cdot 502} \leq \frac{1,1 \cdot 3,8}{1,3} \Leftrightarrow Fd \leq 170,01 kN \quad (38)$$

Posto isto, em condições ideais, a ligação Linha-Perna a partir de um esforço de compressão igual ou superior a 170,01 kN sofreria rotura por corte, este esforço faz corresponder a uma carga global de 149,05kN.

Na asna em estudo, esta rotura deu-se aproximadamente para uma carga global de 95kN ficando assim aquém do valor de rotura calculado, isto reforça a ideia de que a resistência ao corte da ligação Linha-Perna direita estava bastante enfraquecida devido à presença da anomalia fenda anelar, podendo mesmo dizer-se que a resistência ao corte estava reduzida em cerca de 50% da sua resistência em condições normais.

8.5.2. Verificação da resistência da Linha da asna

Como a linha da asna é um elemento sujeito sobretudo a esforços de tracção, a verificação efectuada será para a combinação de esforços de tracção com esforços de flexão.

Segundo a equação (10) do Capítulo 3, a verificação da resistência da Linha é feita da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + K_m \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} &\leq 1 \\ \frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + K_m \cdot \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} &\leq 1 \end{aligned} \quad (39)$$

Como a flexão segundo a direcção zz não existe, a verificação de segurança resume-se a:

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} \leq 1 \quad (40)$$

Sendo assim,

$$\left[\frac{\left(\frac{Ft \times 1000}{100 \times 220} \right)}{\frac{1,1 \times 21}{1,3}} \right] + \frac{\frac{8,14 \times 10^6}{\left(\frac{100 \times 220^2}{6} \right)}}{\frac{1,1 \times 35}{1,3}} \leq 1 \Leftrightarrow Ft \geq 391,126 \text{ kN} \quad (41)$$

A um esforço de tracção na Linha de 391,126 kN, faz corresponder a uma carga de global de 381,56 kN que seriam necessários para que o rotura da estrutura se desse devido a esforços de tracção.

8.5.3. Verificação da resistência da Perna da asna

Ao contrário da linha da asna, a perna é um elemento sujeito sobretudo a esforços de compressão. A verificação efectuada será para a combinação de esforços de compressão com esforços de flexão.

Segundo a equação 13 do Capítulo 3, a verificação da resistência da Perna é feita da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \left[\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right]^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + Km \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} &\leq 1 \\ \left[\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right]^2 + Km \cdot \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} &\leq 1 \end{aligned} \quad (42)$$

Tal como na linha, a flexão segundo a direcção zz não existe, a verificação de segurança resume-se a:

$$\left[\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right]^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} \leq 1 \quad (43)$$

em que,

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{F_c}{\text{Área comprimida}} \quad (44)$$

$$f_{c,0,d} = \frac{K_{mod} \cdot f_{c,0,k}}{\gamma_M} \quad (45)$$

sendo assim,

$$\left[\frac{\left(\frac{F_c \times 1000}{100 \times 180} \right)}{\frac{1,1 \times 24,7}{1,3}} \right]^2 + \frac{\frac{5,85 \times 10^6}{\frac{100 \times 180^2}{6}}}{\frac{1,1 \times 35}{1,3}} \leq 1 \Leftrightarrow F_c \leq 376,56 \text{ kN} \quad (46)$$

Para um esforço de compressão da perna de 376,56 kN, faz corresponder a uma carga global de 330,15 kN a aplicar na estrutura que seria necessária para que a rotura da estrutura se desse devido a esforços de compressão.

Segundo estes resultados, podemos então concluir que a rotura mesmo para condições ideais, dar-se-ia ao nível das ligações, uma vez que para esgotar os elementos de madeira constituintes da asna, seria necessário aplicar à estrutura uma carga global bastante elevada que suplantaria em muito a carga de rotura das ligações, quer por esmagamento, quer por esforços de corte.

8.6. SUGESTÕES DE REFORÇO

Com base em toda a informação reunida e em todos os resultados extraídos quer do ensaio de carga, quer da modelação numérica, torna-se pertinente a sugestão de possíveis técnicas de reforço que poderão ser utilizadas no futuro para aumentar a sua resistência e consequentemente a sua longevidade.

Sabendo que a rotura da asna se deu ao nível das ligações e que esta se deu devido ao deslize de fibras (rotura por corte paralelo às fibras), para que as asnas possam resistir mais a esforços de corte, sugere-se a utilização de técnicas de reforço com

recurso a elementos metálicos, nomeadamente a utilização do varão roscado e a utilização de 2 chapas exteriores ligadas com varões.

A técnica de reforço com recurso a um varão roscado, pode vir a ser benéfica pois no caso da ligação Linha-Perna, consegue impedir o avanço excessivo da Perna no sentido da Linha, prevenindo assim a transmissão de esforços excessivos de corte da Perna para a Linha.



Figura 62 Reforço com recurso ao varão roscado [4]

Quanto à utilização de chapas exteriores ligadas com varões, pode igualmente vir a ser bem sucedida para o reforço dessa mesma ligação, pois a transmissão do esforço axial da Perna para a Linha seria feita de um modo mais distribuído, reduzindo assim o esforço de corte concentrado no dente da ligação.

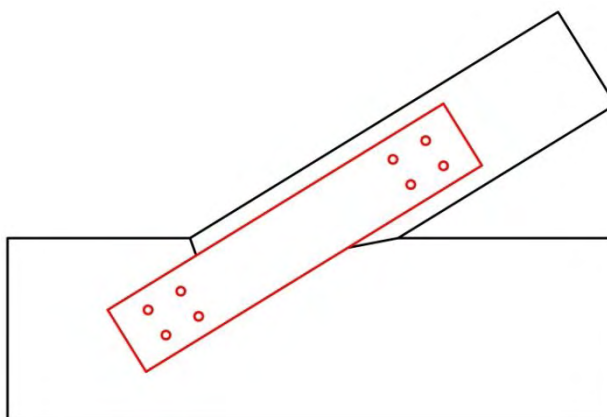


Figura 63 Reforço com recurso a chapas ligadas por varões roscados

CAPÍTULO 9. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

As conclusões decorrem da campanha de ensaio realizada e da consequente modelação numérica, tendo sido realizadas de acordo com os objectivos norteadores do presente estudo. Conclui-se que a metodologia escolhida foi adequada ao desenvolvimento do presente trabalho e na obtenção de resultados viáveis e esclarecedores. De seguida proceder-se-á ao enunciado das principais conclusões que decorreram de todos os ensaios, modelações e cálculos efectuados que constituíram a metodologia.

Relativamente aos ensaios não destrutivos (non destructive tests – NDT), estes revelaram-se de uma importância vital para a avaliação do estado de conservação/degradação dos elementos em madeira e, consequentemente, permitiram uma adequada modelação numérica da estrutura. Através destes ensaios, e tendo por base a inspecção visual, foi possível mapear as zonas mais sensíveis da estrutura bem como prever o modo de rotura esperado. É de salientar que o modo de rotura provocado pelo ensaio de carga sucedeu tal como indicado pela fase de inspecção e diagnóstico da asna.

O ensaio de carga cíclico da asna constitui a fase determinante de todo o trabalho realizado, servindo de base para a modelação numérica a realizar *a posteriori*.

Referente à modelação numérica realizada, constatou-se que o comportamento da asna é dependente não dos elementos constituintes mas sim das suas ligações, sendo que a rigidez das mesmas é o factor determinante do comportamento de toda a estrutura.

Acompanhando esta modelação efectuaram-se diversos cálculos que foram de encontro à suspeita inicial que consistia em que a rotura da asna se daria ao nível das ligações e não ao nível dos elementos constituintes.

A última etapa deste trabalho recaiu na escolha de possíveis técnicas de reforço que pudessem ser eficazes no aumento de resistência das ligações, nomeadamente na resistência aos esforços de corte.

A escolha realizada recaiu em elementos metálicos, tendo sido escolhidos o reforço com varões roscados e reforço com duas chapas ligadas por varões.

Com base nos resultados obtidos e na revisão bibliográfica efectuada, recomenda-se que futuros estudos tenham por base algumas linhas orientadoras.

Tendo o conhecimento da existência de mais 2 asnas presentes no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, sugere-se a realização de campanhas de ensaio, com vista a utilizar técnicas de reforço tendo em conta os resultados obtidos no presente trabalho, podendo para isto serem utilizados elementos metálicos tal como foi sugerido ou até mesmo elementos compósitos (FRP's). Recomenda-se que nestes trabalhos seja efectuada uma monitorização mais exaustiva, nomeadamente ao nível dos deslocamentos relativos entre os diversos elementos, com vista a realizar uma modelação numérica mais eficaz e mais aproximada da realidade.

Ao terminar este trabalho, é importante mencionar as dificuldades e limitações presentes ao longo do estudo.

As dificuldades sentidas prenderam-se sobretudo ao nível da realização do ensaio de carga. Numa fase inicial, foram encontradas dificuldades no arranjo espacial da asna no Laboratório, uma vez que existiam outros trabalhos pendentes que impossibilitavam a utilização de um maior espaço para a realização do estudo. Posteriormente, sentiu-se igual dificuldade na aquisição de materiais mais adequados, nomeadamente para o sistema de contraventamento da estrutura, uma vez que o sistema ideal seria algo dispendioso e de difícil aquisição tendo em conta o factor tempo. Para colmatar e ultrapassar este aspecto foi necessário criar um sistema alternativo (sistema realizado com recurso a prumos de obra robustos) que se revelou ser bastante trabalhoso mas igualmente eficaz.

Quanto às limitações, estas resumem-se à falta de monitorização de deslocamentos relativos em mais ligações da asna, tendo sido monitorizado apenas uma ligação (Linha-Pendural Principal), sendo insuficientes para realizar uma modelação numérica mais eficaz e mais próxima do contexto real.

Apesar de todas as dificuldades e limitações sentidas, os resultados manifestaram-se satisfatórios, podendo este estudo constituir um contributo e/ou incentivo para futuras investigações nesta temática, dado que presentemente são escassos os trabalhos científicos na mesma.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] EN 1995-1-1: 2004. Eurocode 5: Design of timber structures – Part 1-1: General – Common rules and rules for buildings. *European Committee for Standardization, CEN*.
- [2] Branco J., Santos A. e Cruz P. (2008) - Asnas tradicionais em Madeira: evolução, comportamento e reforço com materiais compósitos - *Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas*, Série II, número 3, 5-18.
- [3] Cachim P. (2007) – *Construções em Madeira: A madeira como material de construção*. Publindústria, Porto.
- [4] Branco J. (2008) - *Influence of the joints stiffness in the monotonic and cyclic behaviour of traditional timber trusses. Assessment of the efficacy of different strengthening techniques*. Tese de Doutoramento. Universidade do Minho e Universidade de Trento.
- [5] Branco J., Cruz P. e Piazza M. (2006) - Asnas de madeira: A importância da rigidez das ligações - *Jornadas Portuguesas das Engenharias de Estruturas*, 4ª edição, Lisboa.
- [6] Branco J.M., Cruz P.J.S., Piazza, M. and Varum, H. (2008) - Field tests of a timber queen-post truss and numerical analysis, *SAHC 2008 - Structural Analysis of Historical Constructions*, Bath, UK, 02-04 July, 507-513.
- [7] Segurado J.E.S. (1975) – *Trabalhos de Carpintaria Civil*. Livraria Bertrand, Lisboa.
- [8] Costa F. (1955) - *Enciclopédia Prática da Construção Civil*. Edição do Autor. Depositária Portugália Editora, Lisboa.

- [9] Lewandoski, J.; Levion, E.; Sobon, J. (2006) - Historic American roof trusses. Timber Frames Guild, USA.
- [10] Branco J., Cruz P., Piazza M. e Varum H. (2006) - Asnas tradicionais de madeira: Comportamento estático e dinâmico de asnas simples. Universidade do Minho.
- [11] Feio, A. (2005) - Inspection and Diagnosis of Historical Timber Structures: NDT Correlations and Structural Behavior. Tese de Doutoramento, Universidade do Minho.
- [12] Cruz H. e Palma P. (2004) - Ligações em estruturas de Madeira: Para além dos pregos quadrados, LNEC, Lisboa.
- [13] Appleton J. (2003) - Reabilitação de Edifícios Antigos. Patologias e Tecnologias da Intervenção, Edições Orion, Setembro, 454 pp.
- [14] Madsen B. (1998) - Reliable timber connections. *Progress in Structural Engineering and Materials*. Volume I (3), pp-245-252.
- [15] Palma P. e Cruz H. (2004) - Comportamento de ligações tradicionais em estruturas de madeira - *Jornadas Portuguesas das Engenharias de Estruturas*, 4^a edição, Lisboa.
- [16] Hansson M. e Larsen H.(2005) - Recent failures in glulam and their causes. *Engineering Failure Analysis*. Volume 12 (5), pp.808-818.
- [17] Rodrigues R. (2004) – Construções antigas de madeira: Experiência de obra e reforço estrutural. *Tese de Mestrado*. Universidade do Minho.
- [18] Demarzo M. e Almeida P. (2005) - Case of a fatal accident in the wood roof trusses of a church. IABSE Symposium Lisbon.

- [19] Ferreira L., Lobo A, Javarroni C. e Agnelli N. (2004) - Patologias em estruturas de madeira de telhados. FEB-UNESP – Bauru/ São Paulo.
- [20] Parisi M. e Piazza M. (2005) - Seismic evaluation and strengthening of timber structures in traditional buildings. Lisboa.
- [21] Branco J., Cruz P., Piazza M. e Varum H. (2005) - Experimental analysis of birdsmouth joints. *Technical Report E-11/05*, University of Minho, Guimarães, Portugal.
- [22] Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes – Decreto-Lei nº235/83, de 31 de Maio. Porto Editora.
- [23] LNEC. 1997. *Madeira para estruturas – Pinho Bravo para estruturas*. LNEC (eds), Ficha M2. ISSN 0873-6472, Lisboa.
- [24] UNI 11035-1:2003. Structural timber - Visual strength grading for Italian structural timbers: terminology and measurement of features. *Ente Nazionale Italiano di Unificazione*.
- [25] Ross R.J. e Pellerin, R.F. (1994) – Nondestructive Testing for Assessing Wood Members in Structures: A review. Gen. Tech. Rep. *FPL-GTR-70* (Rev.). Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 40 p.
- [26] Lousada J.L., Gaspar M.J. e Bento E.M. (2005) – Uso do Pilodyn para a estimativa da densidade da madeira de *Eucalyptus Nitens*. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Depto. Florestal.
- [27] Rinntech (2008) – *Resistograph® Series 4, Drill resistance measuring unit: Electronically controlled, automatic drill resistance measurement for trees, hardwood and softwood*. Heuidelberg, Germany.

- [28] Valle A., Brites R.D. e Lourenço P.B. (2006) – Uso da perfuração controlada na avaliação de degradação da madeira em edificações antigas: caso de estudo. 10º Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira - *EBRAMEM 2006*. São Paulo, Brasil.

- [29] SAP 2000. Static and Dynamic Finite Element Analysis of Structures. Structural Analysis Program. Computers and Structures. Inc., Advanced 9.03. California. USA.

- [30] Piazza M. e Brentari G. (2006) – Le capriate di copertura del teatro social di Trento. *Tesi di Laurea*. Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Strutturale, Facoltà di Ingegneria, Università degli Studi di Trento.

ANEXO A. CORTE DA ASNA

Depois de terem sido realizados todos os trabalhos ao nível da asna, por motivos de arranjo espacial no laboratório de Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, teve que proceder-se ao corte e desmantelamento de toda a asna.

Este corte foi efectuado com o máximo cuidado de maneira a que não pusesse em causa a integridade física das pessoas que efectuaram o corte da asna.

Durante o corte, teve-se o cuidado de cortar a asna em alguns pontos onde tinha sido realizado o ensaio de Resistograph®, com vista em melhor entender os resultados obtidos através desse mesmo ensaio.



Linha de perfuração do Resistograph®

Figura A1 Secção avaliada pelo Resistograph®

Através do desmantelamento da asna, pôde também constatar-se de uma maneira mais explícita uma das anomalias estruturais da asna ensaiada, sendo que a encurvadura da Linha da asna aparentava estar mais pronunciada, Figura 64.

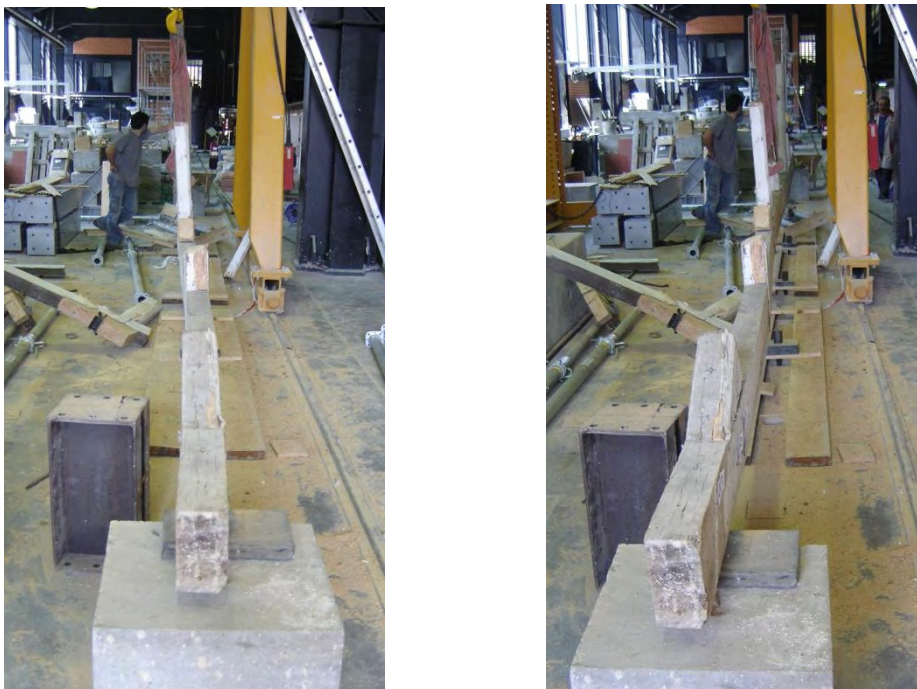


Figura 64 Encurvadura lateral da Linha da asna

É importante mencionar também que aquando do corte da asna constatou-se um odor intenso a resina, revelando de certo modo uma boa constituição interna mesmo após todos estes anos.

ANEXO B. RESULTADOS DO RESISTOGRAPH®

De seguida são mostrados todos os resultados obtidos com o ensaio de Resistograph®, juntamente com o registo fotográfico da secção. Este registo fotográfico não foi realizado para todas as secções devido à impossibilidade de cortar o elemento em causa no local exacto onde tinha sido realizado o ensaio.

Secção R1

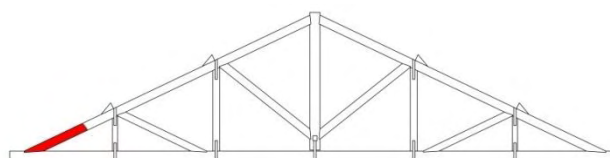


Figura B1 Secção avaliada e mapeamento do ensaio efectuado (R1)

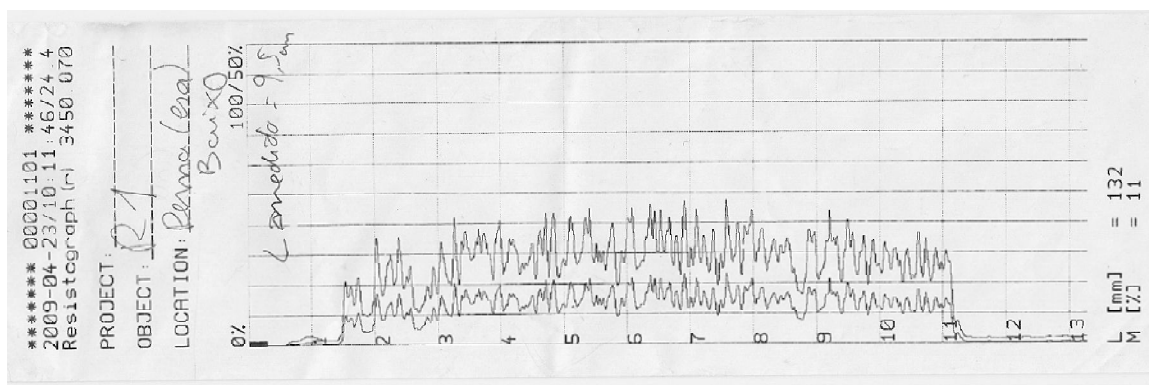


Figura B2 Resultado extraído directamente do Resistograph® (R1)

Secção R2

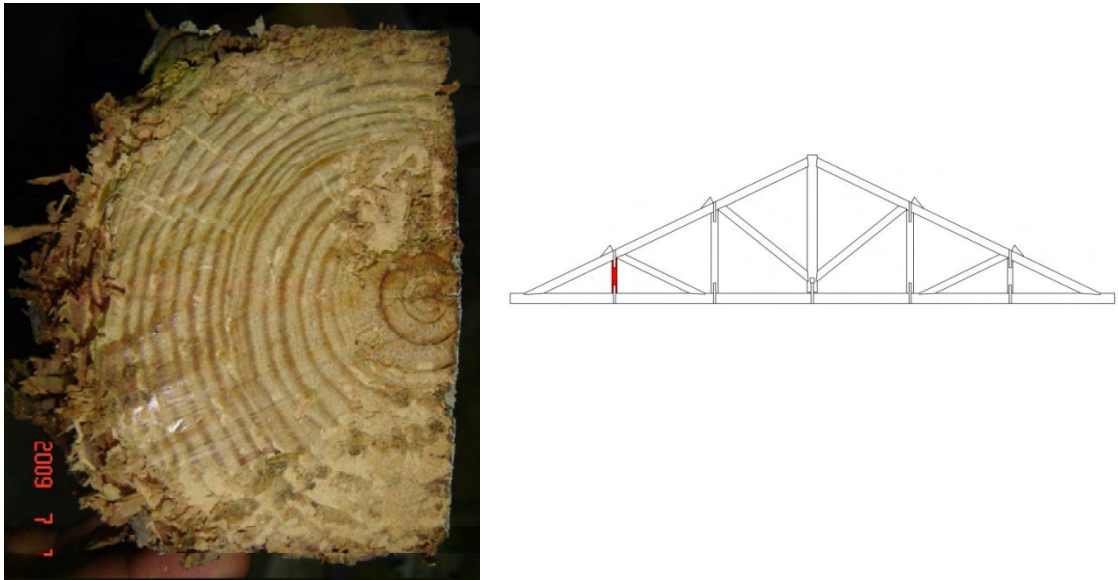


Figura B3 Secção avaliada e mapeamento do ensaio efectuado (R2)

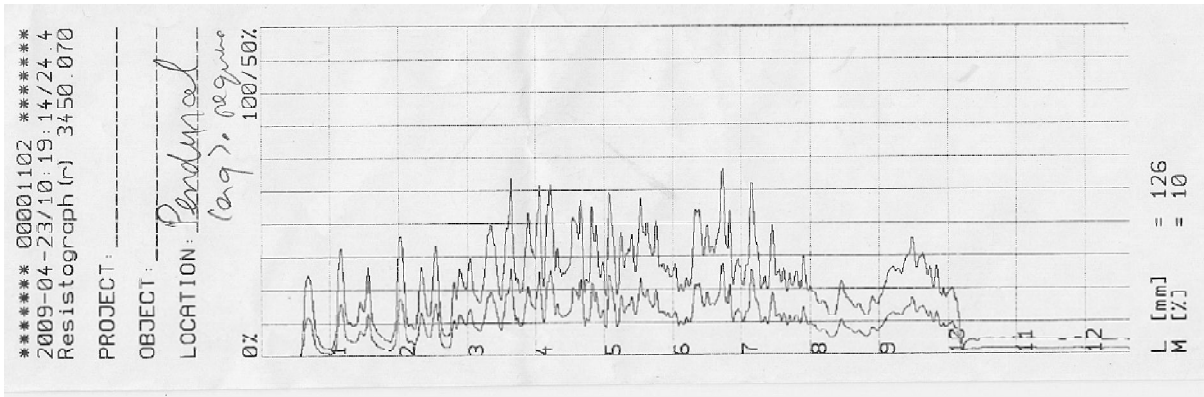


Figura B4 Resultado extraído directamente do Resistograph® (R2)

Secção R3

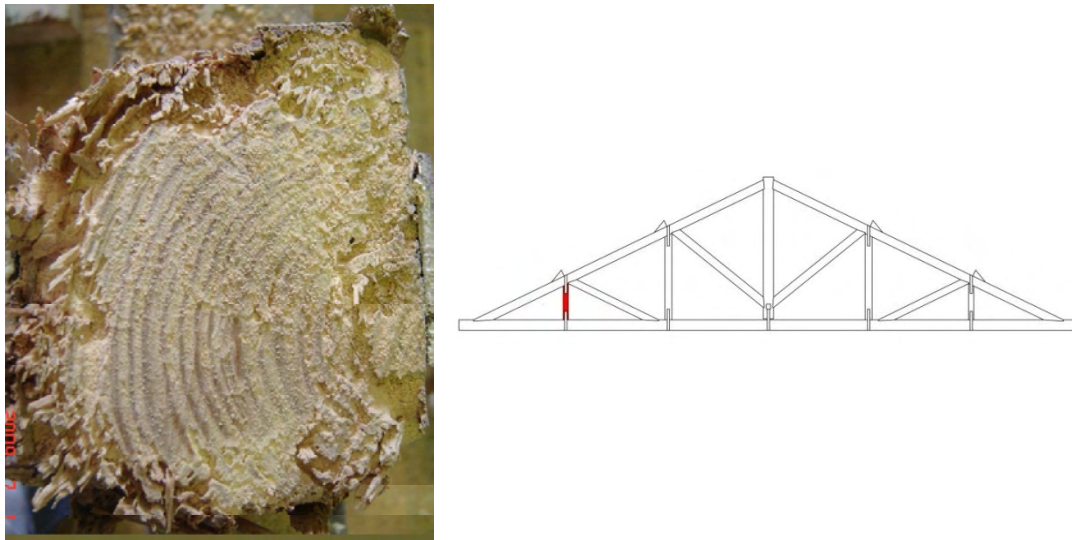


Figura B5 Secção avaliada e mapeamento do ensaio efectuado (R3)

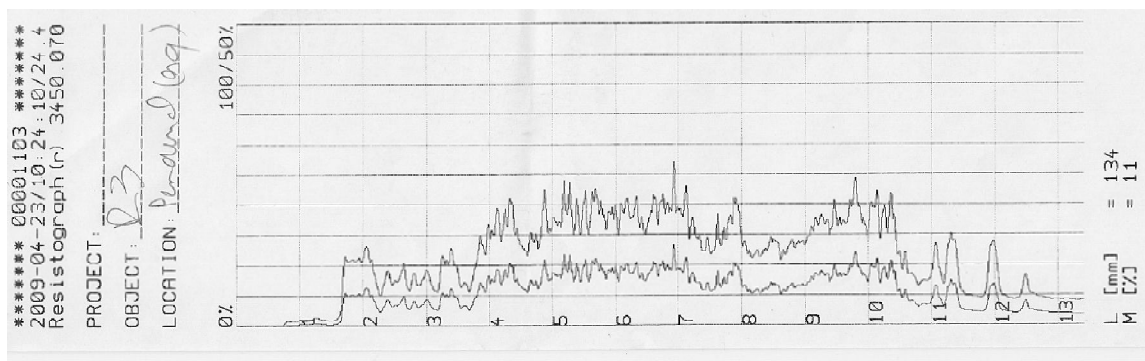


Figura B6 Resultado extraído directamente do Resistograph® (R3)

Secção R4

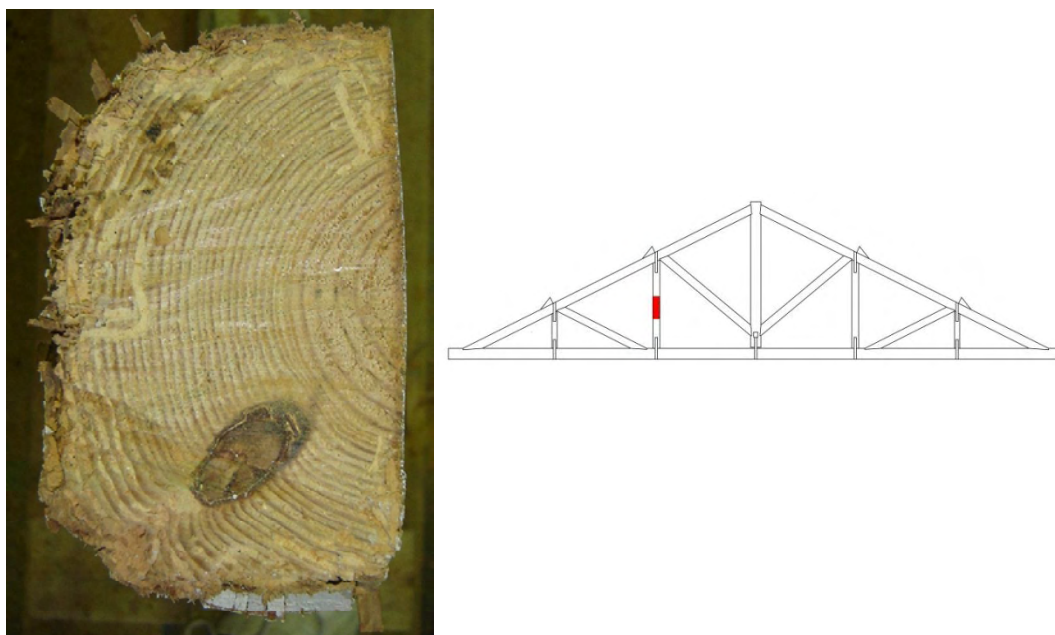


Figura B7 Secção avaliada e mapeamento do ensaio efectuado (R4)

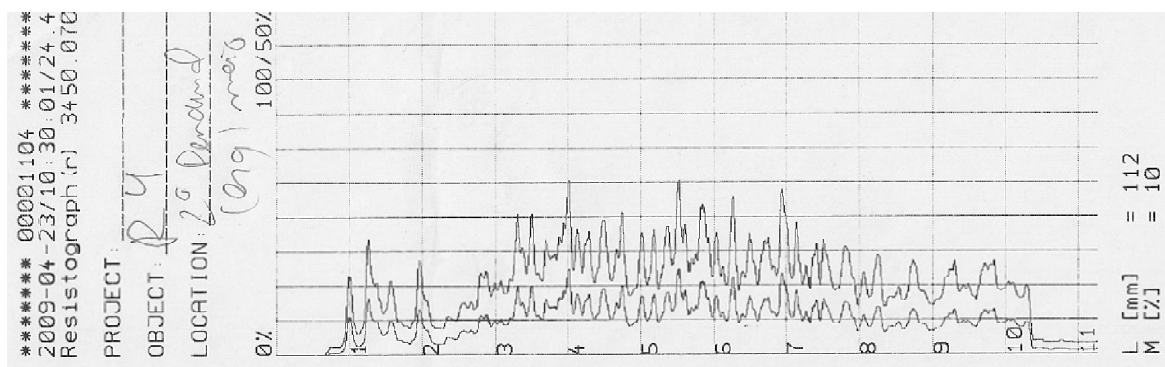


Figura B8 Resultado extraído directamente do Resistograph® (R4)

Secção R6



Figura B9 Secção avaliada e mapeamento do ensaio efectuado (R6)

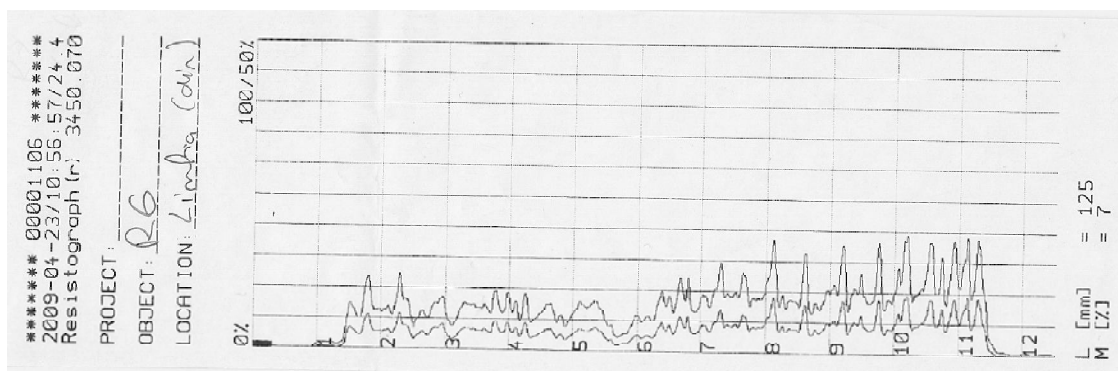


Figura B10 Resultado extraído directamente do Resistograph® (R6)

Secção R7



Figura B11 Secção avaliada e mapeamento do ensaio efectuado (R7)

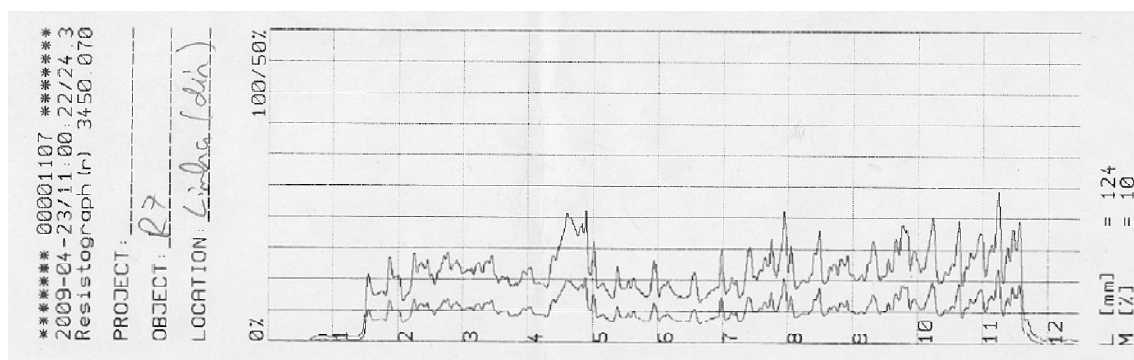


Figura B12 Resultado extraído directamente do Resistograph® (R7)

Secção R10



Figura B13 Secção avaliada e mapeamento do ensaio efectuado (R10)

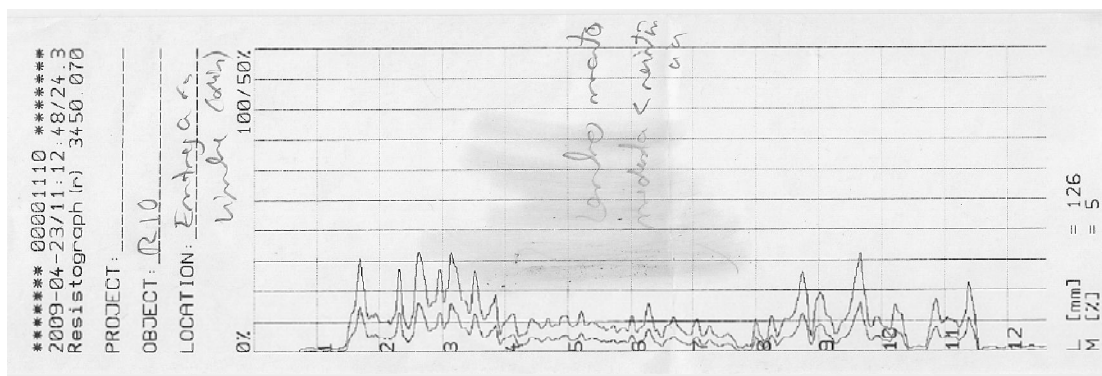


Figura B14 Resultado extraído directamente do Resistograph® (R10)

Secção R12



Figura B15 Secção avaliada e mapeamento do ensaio efectuado (R12)

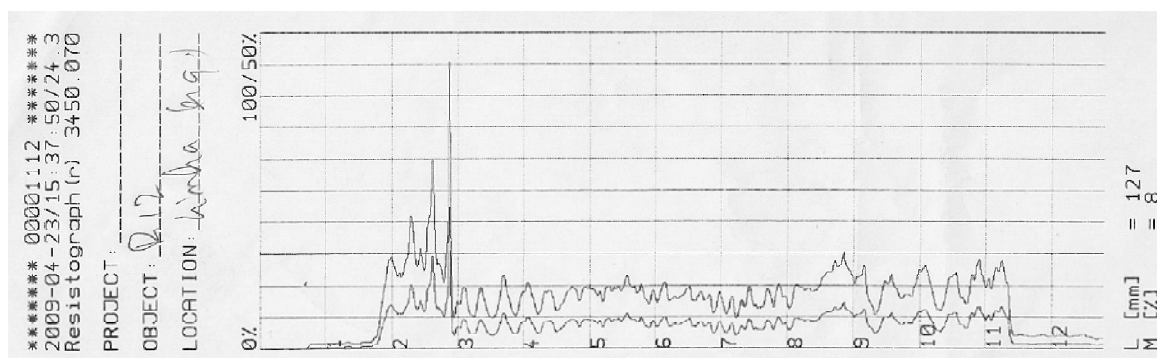


Figura B16 Resultado extraído directamente do Resistograph® (R12)

Secção R14

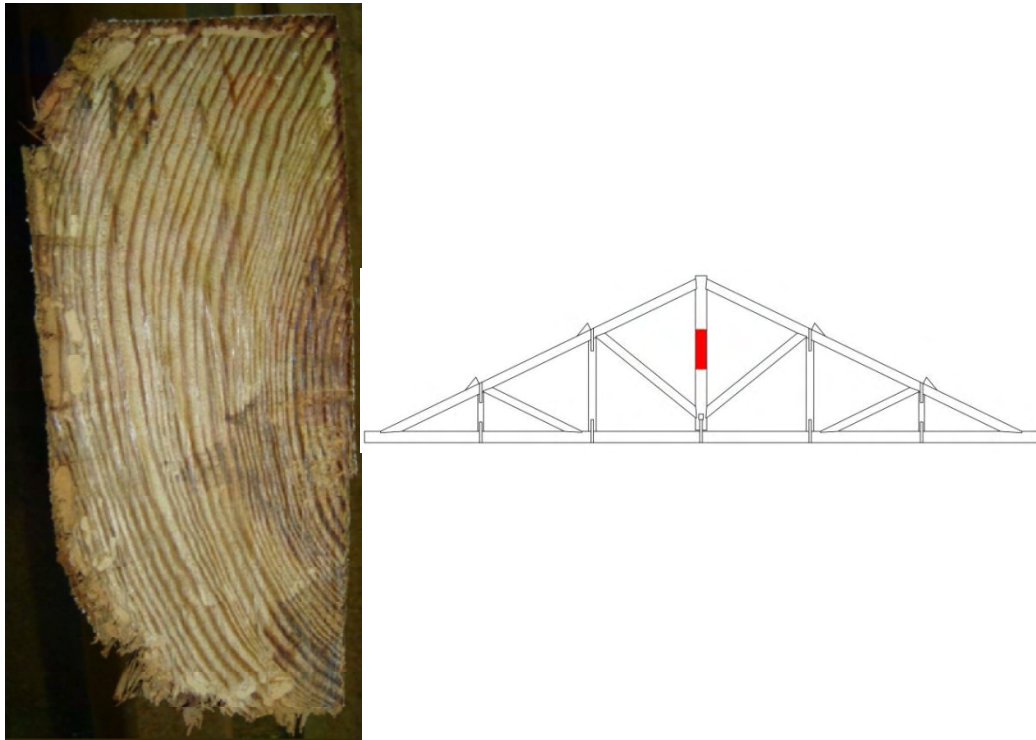


Figura B17 Secção avaliada e mapeamento do ensaio efectuado (R14)

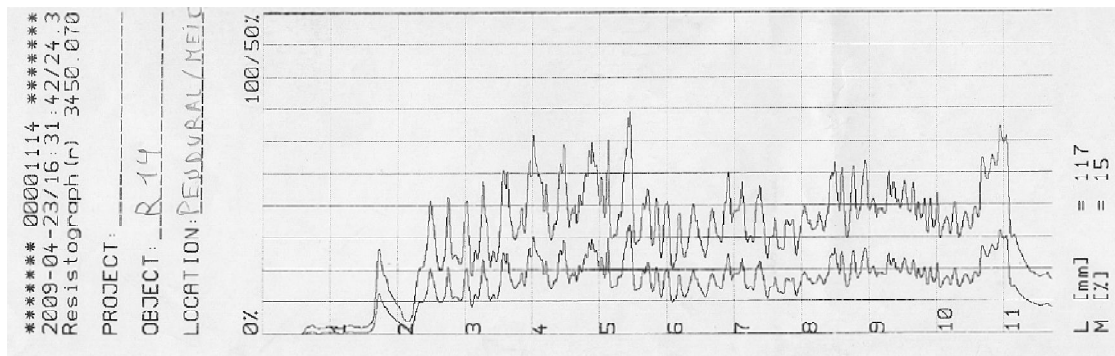


Figura B18 Resultado extraído directamente do Resistograph® (R14)

Secção R15



Figura B19 Secção avaliada e mapeamento do ensaio efectuado (R15)

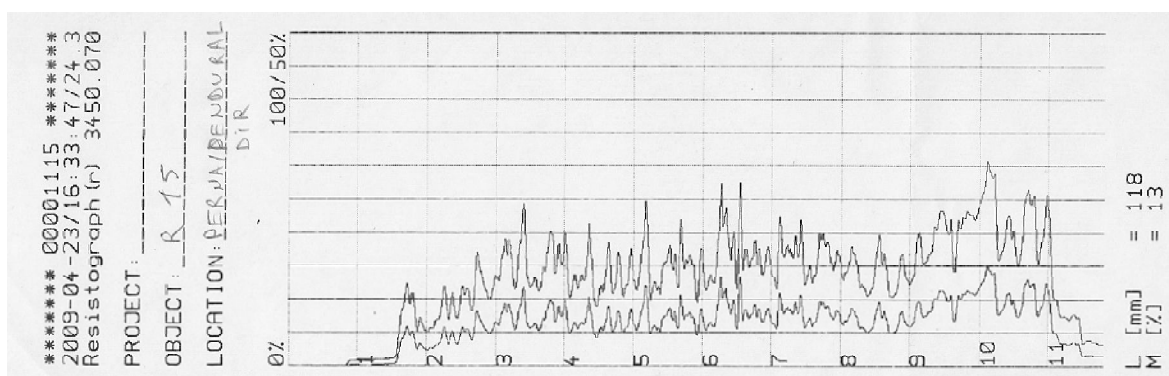


Figura B20 Resultado extraído directamente do Resistograph® (R15)

Secção R16

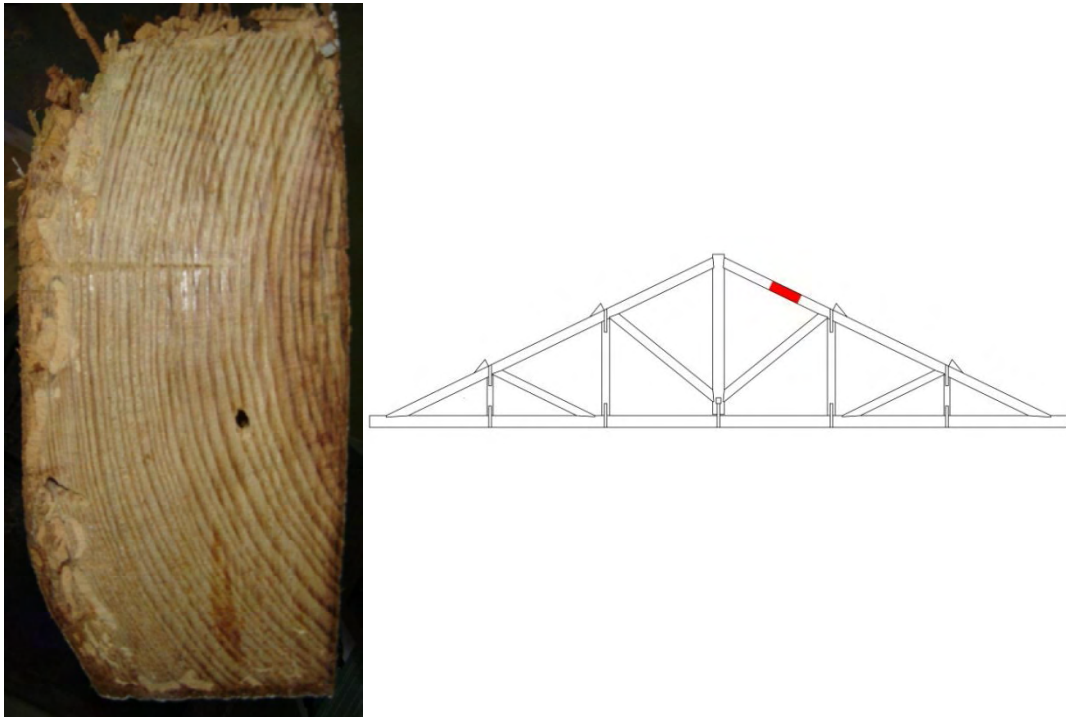


Figura B21 Secção avaliada e mapeamento do ensaio efectuado (R16)

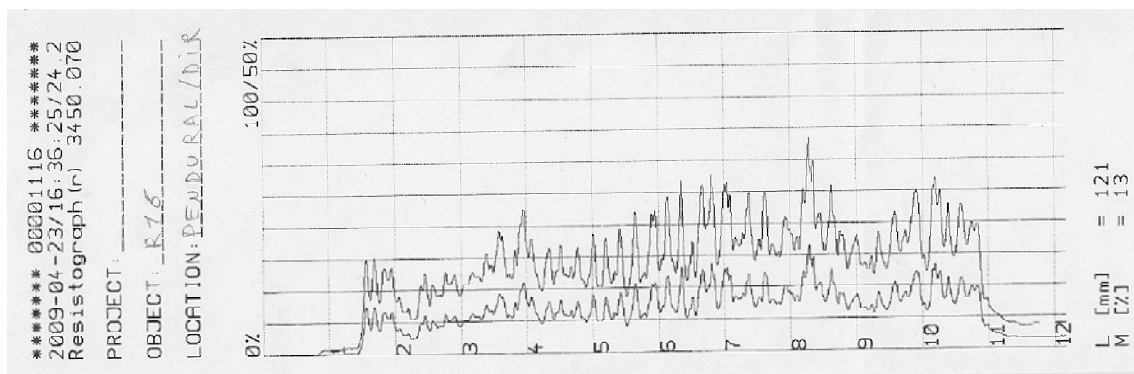


Figura B22 Resultado extraído directamente do Resistograph® (R16)

Secção R18

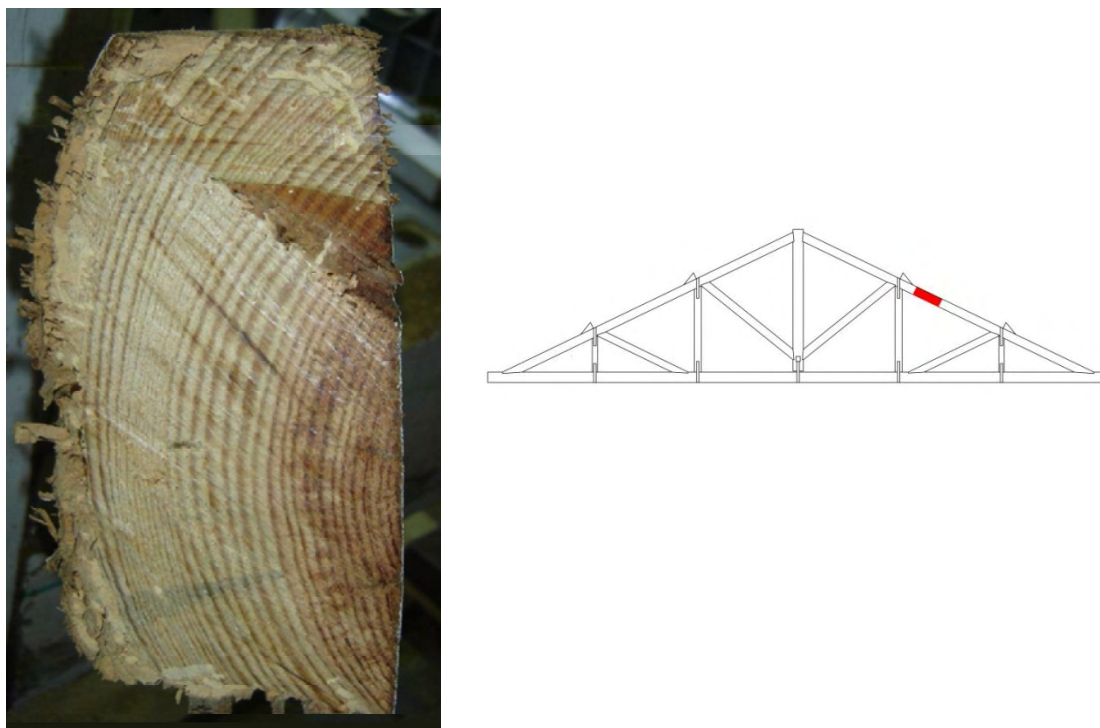


Figura B23 Secção avaliada e mapeamento do ensaio efectuado (R18)

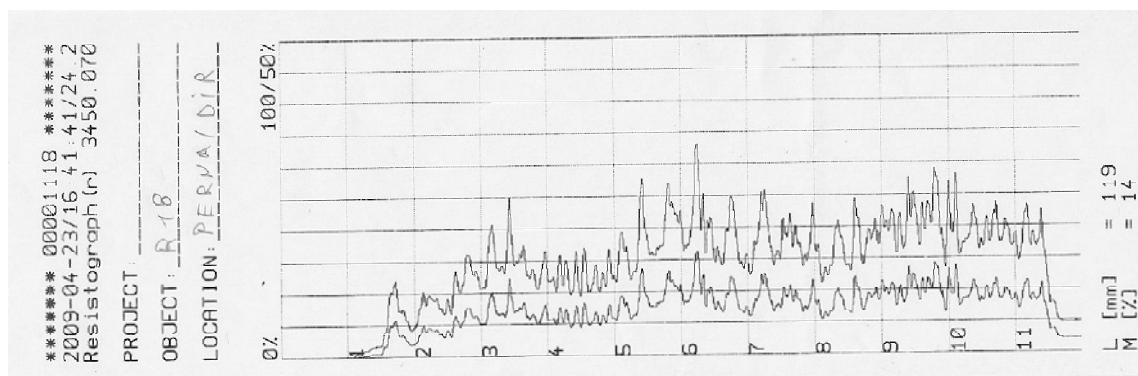


Figura B24 Resultado extraído directamente do Resistograph® (R18)

Secção R21



Figura B25 Secção avaliada e mapeamento do ensaio efectuado (R21)

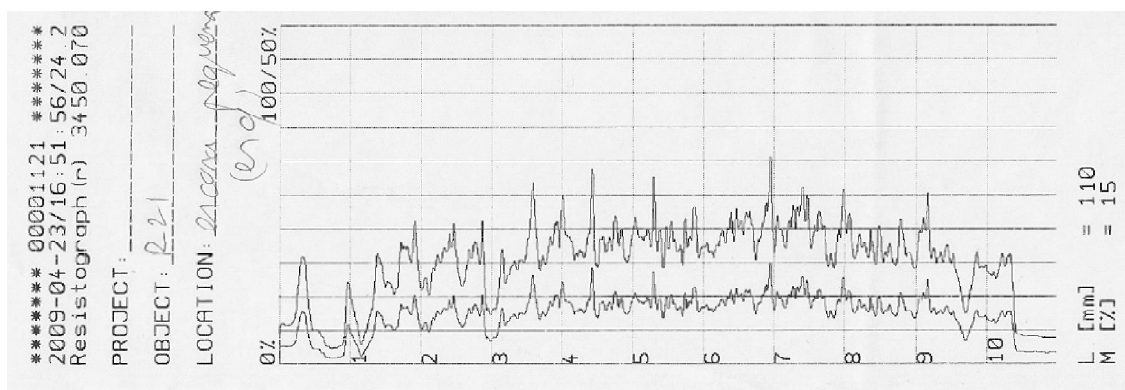


Figura B26 Resultado extraído directamente do Resistograph® (R21)

Secção R22

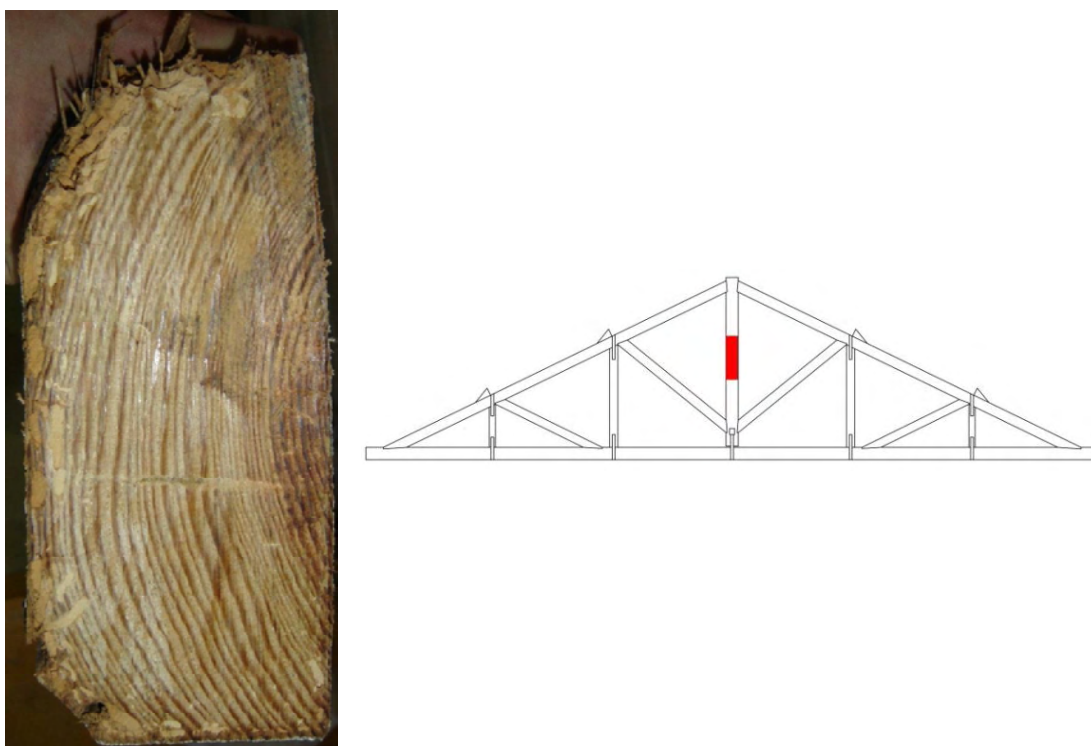


Figura B27 Secção avaliada e mapeamento do ensaio efectuado (R22)

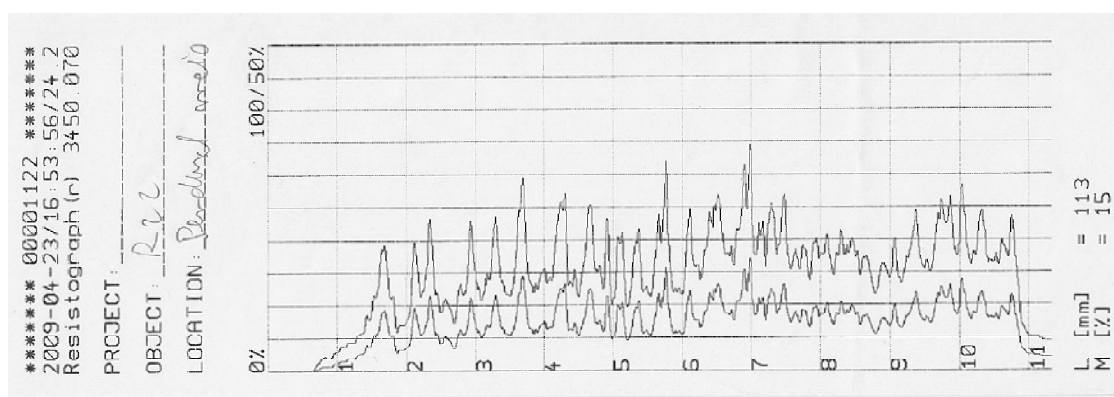


Figura B28 Resultado extraído directamente do Resistograph® (R22)

Secção R25



Figura B29 Secção avaliada e mapeamento do ensaio efectuado (R25)

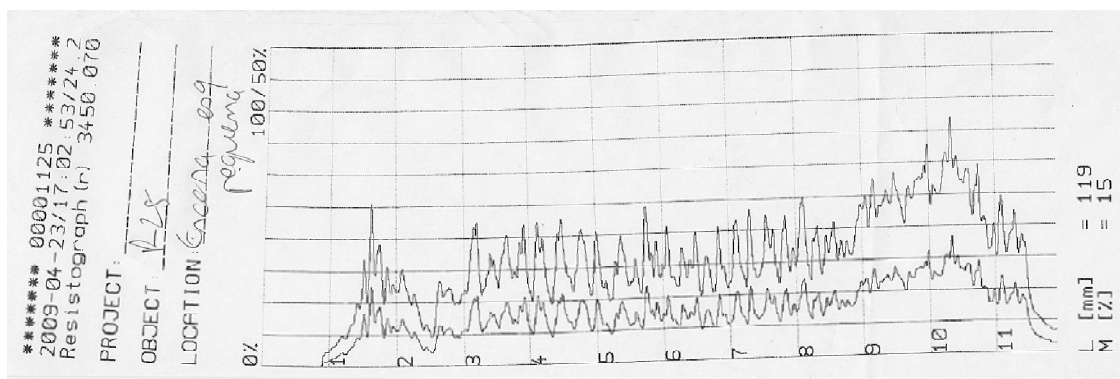


Figura B30 Resultado extraído directamente do Resistograph® (R25)

Secção R26

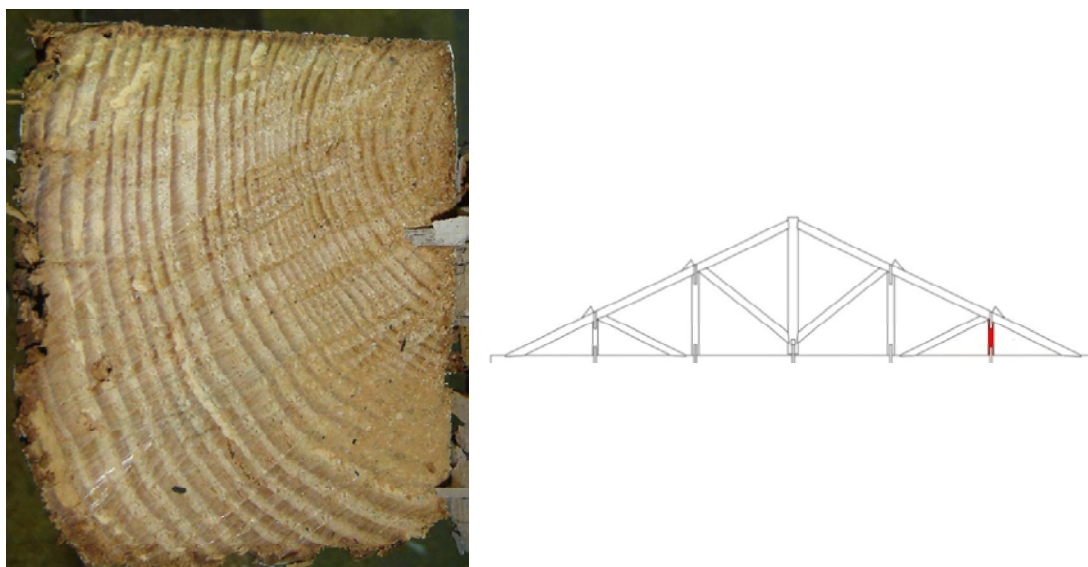


Figura B31 Secção avaliada e mapeamento do ensaio efectuado (R26)

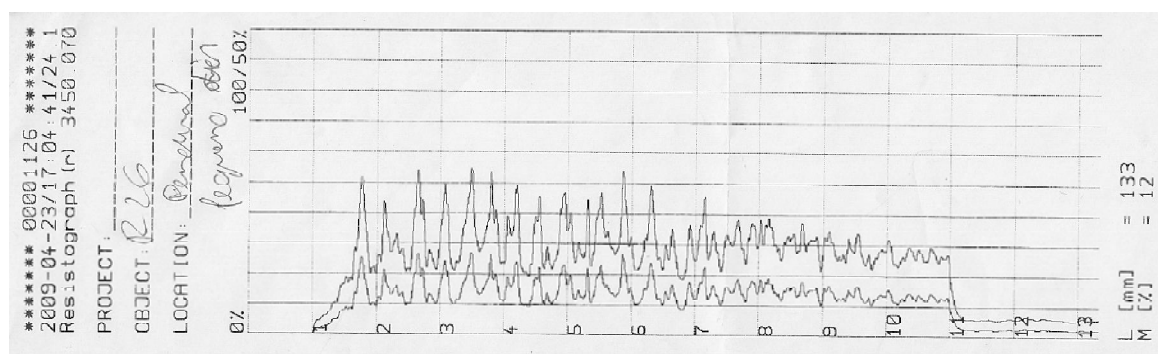


Figura B32 Resultado extraído directamente do Resistograph® (R26)

Secção R5

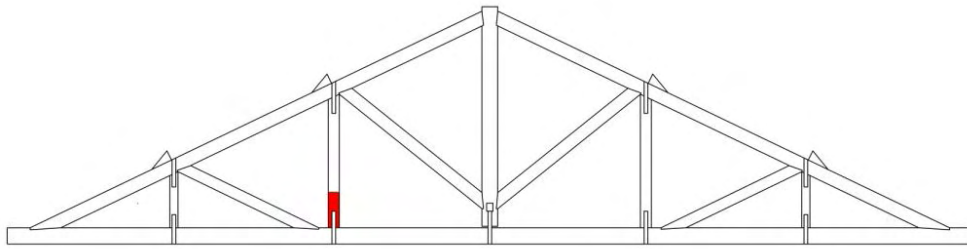


Figura B33 Mapeamento do ensaio efectuado (R5)

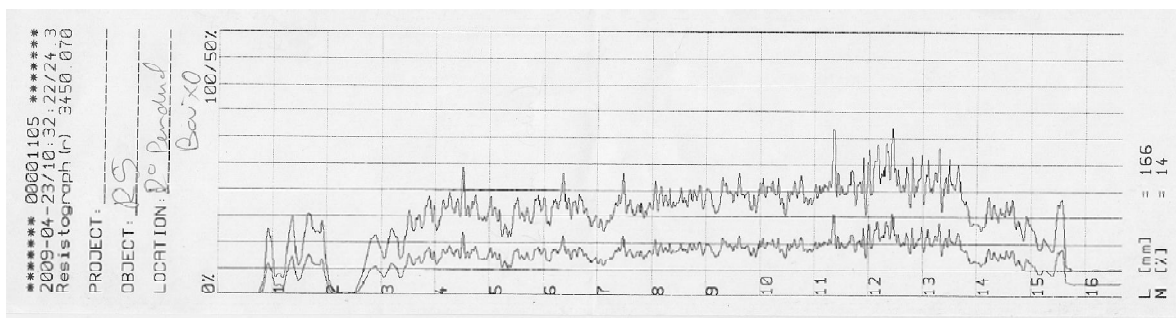


Figura B34 Resultado extraído directamente do Resistograph® (R5)

Secção R8

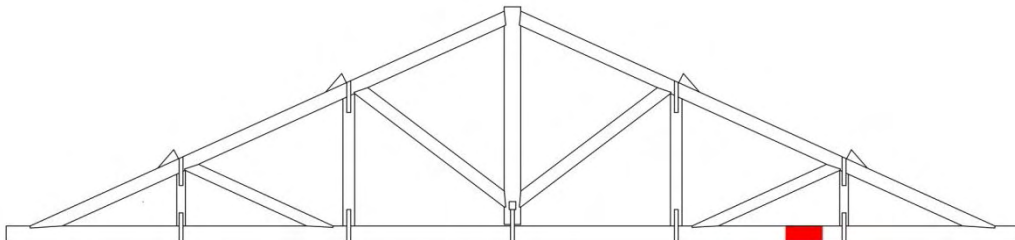


Figura B35 Mapeamento do ensaio efectuado (R8)

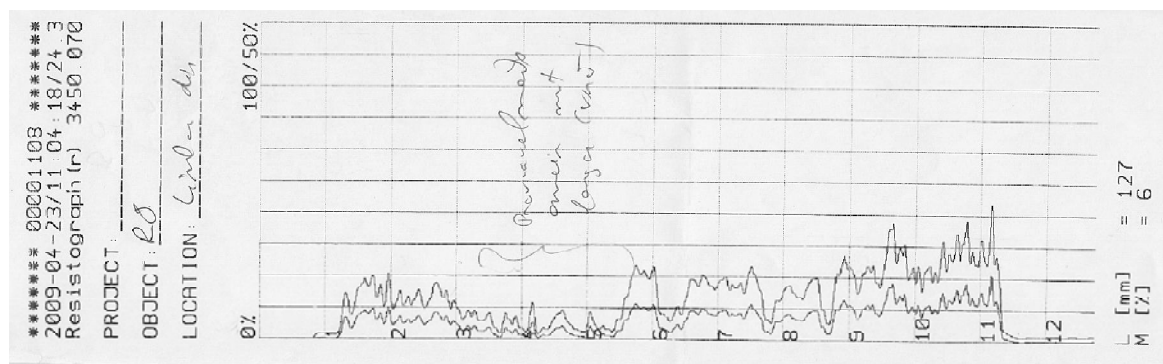


Figura B36 Resultado extraído directamente do Resistograph® (R8)

Secção R9

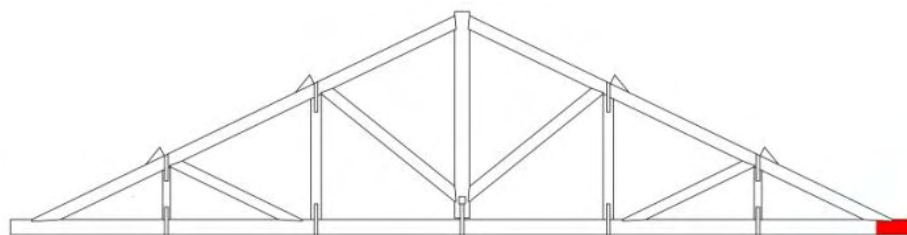


Figura B37 Mapeamento do ensaio efectuado (R9)

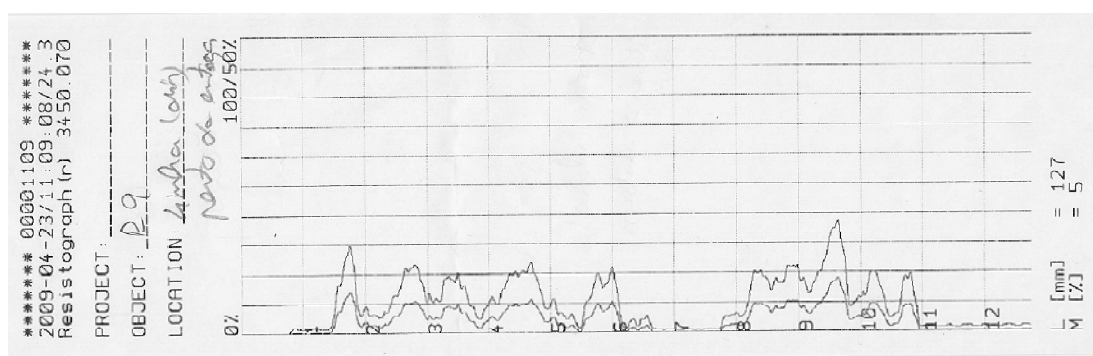


Figura B38 Resultado extraído directamente do Resistograph® (R9)

Secção R11

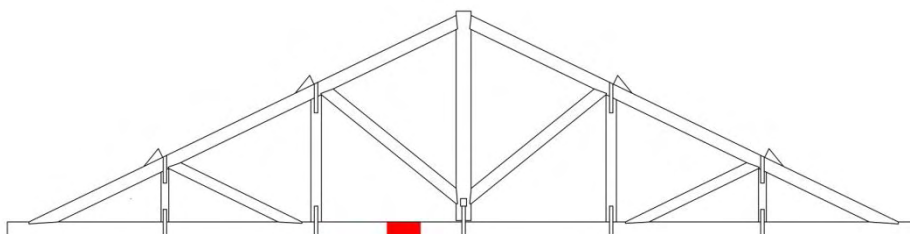


Figura B39 Mapeamento do ensaio efectuado (R11)

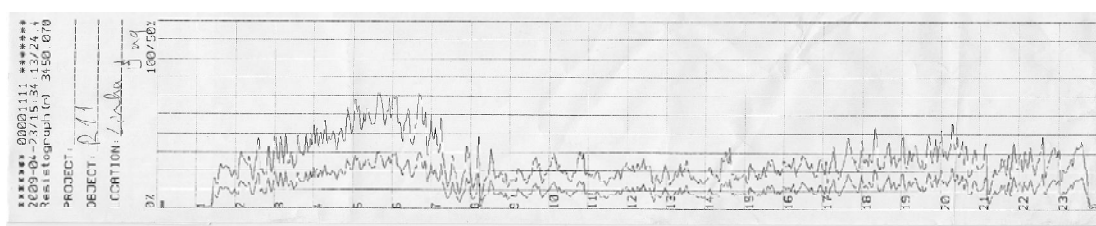


Figura B40 Resultado extraído directamente do Resistograph® (R11)

Secção R13

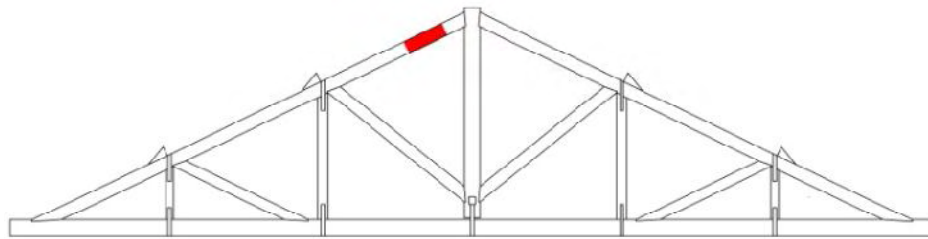


Figura B41 Mapeamento do ensaio efectuado (R13)

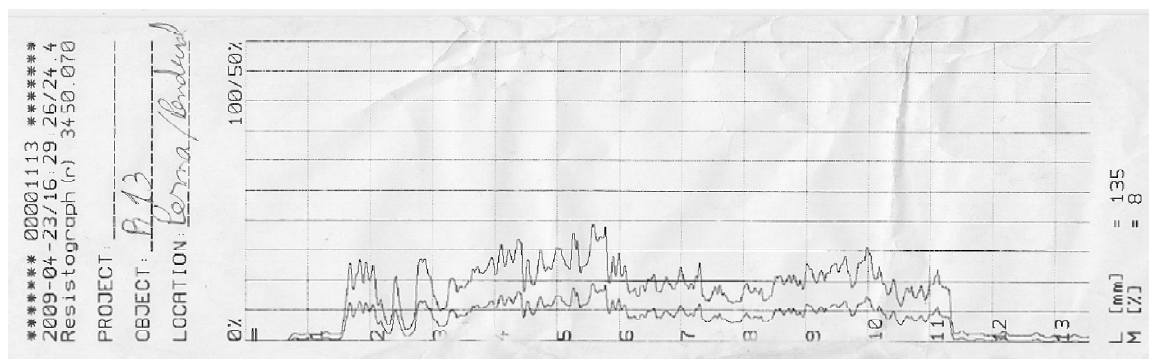


Figura B42 Resultado extraído directamente do Resistograph® (R13)

Secção R17

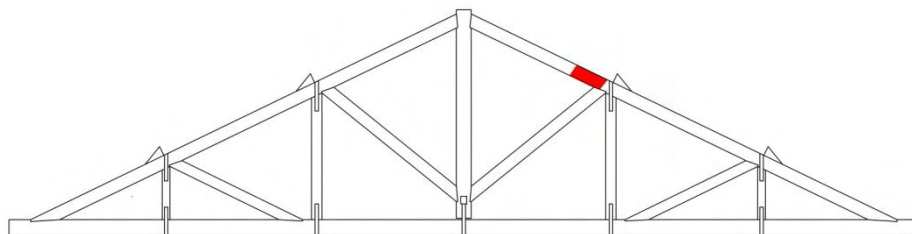


Figura B43 Mapeamento do ensaio efectuado (R17)

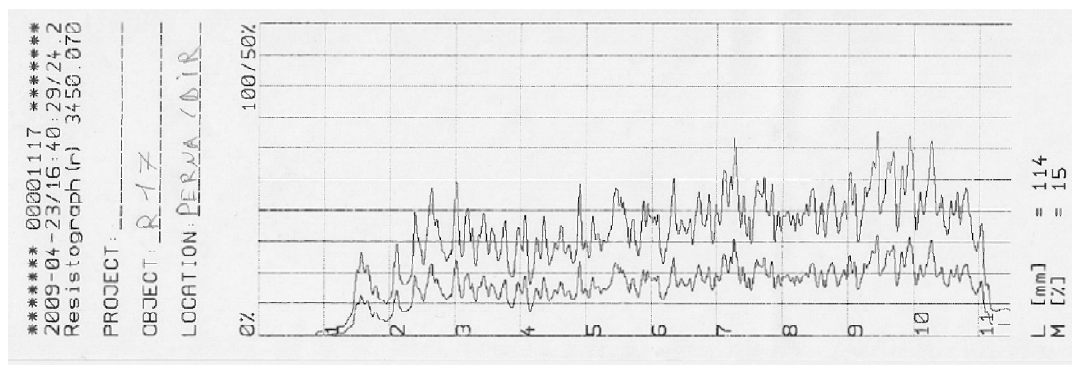


Figura B44 Resultado extraído directamente do Resistograph® (R17)

Secção R19

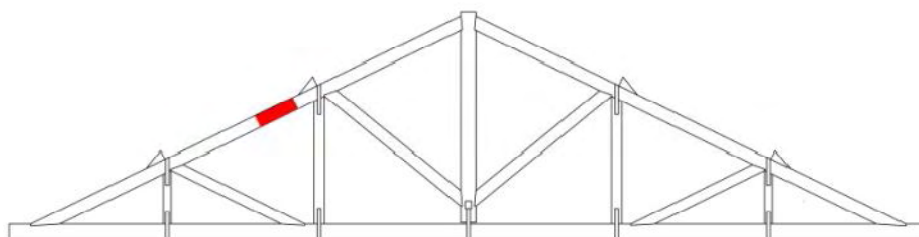


Figura B45 Mapeamento do ensaio efectuado (R19)

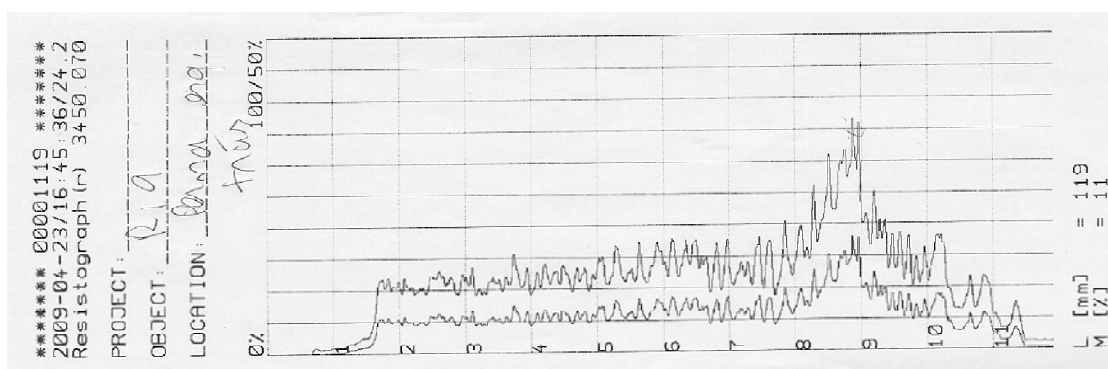


Figura B46 Resultado extraído directamente do Resistograph® (R19)

Secção R20

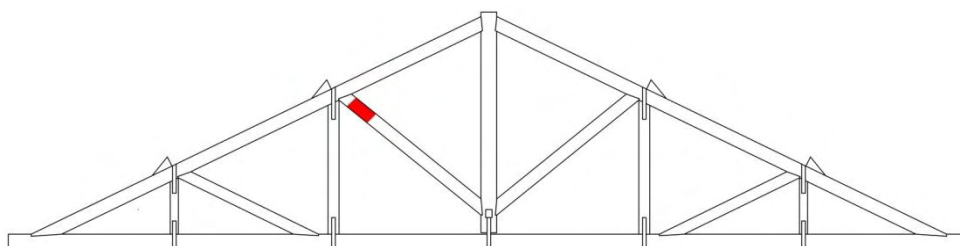


Figura B47 Mapeamento do ensaio efectuado (R20)

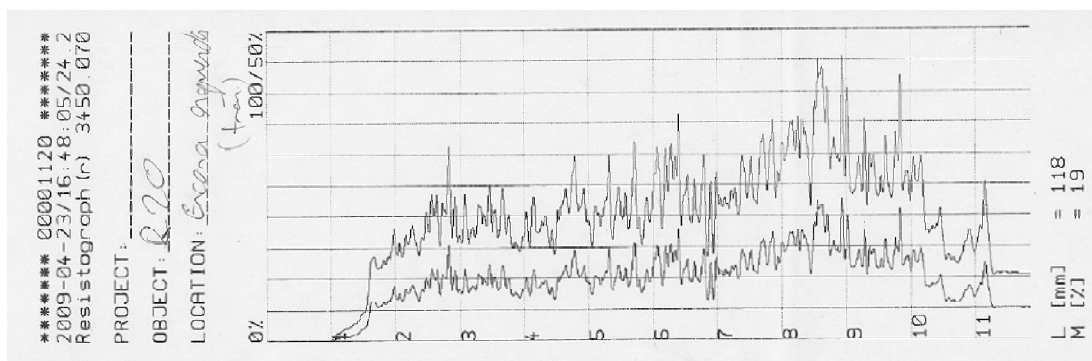


Figura B48 Resultado extraído directamente do Resistograph® (R20)

Secção R23

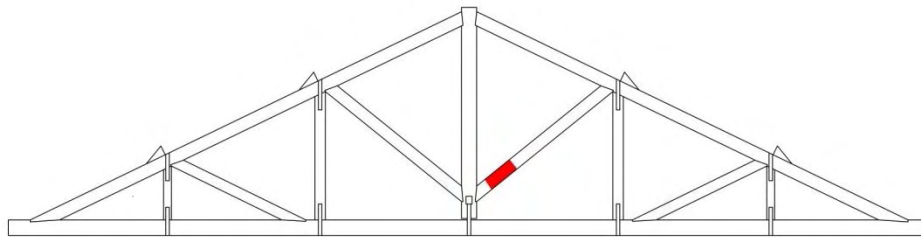


Figura B49 Mapeamento do ensaio efectuado (R23)

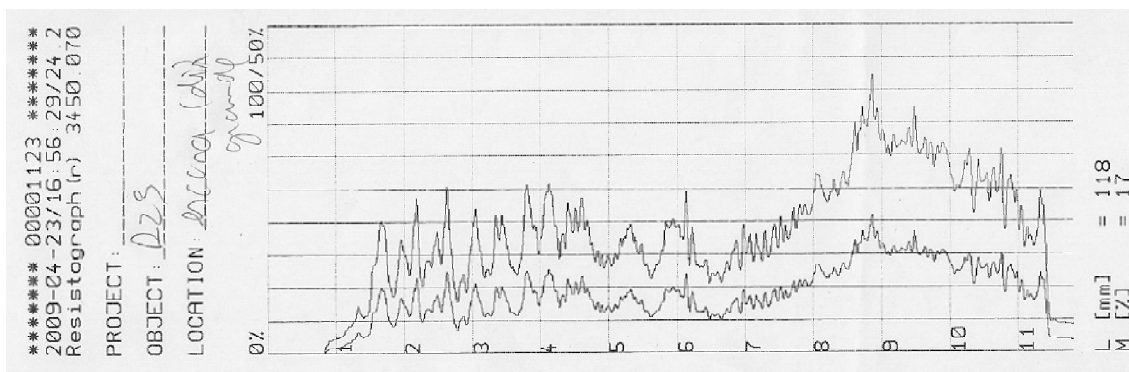


Figura B50 Resultado extraído directamente do Resistograph® (R23)

Secção R24

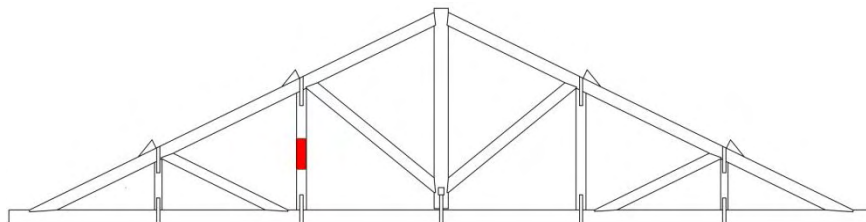


Figura B51 Mapeamento do ensaio efectuado (R24)

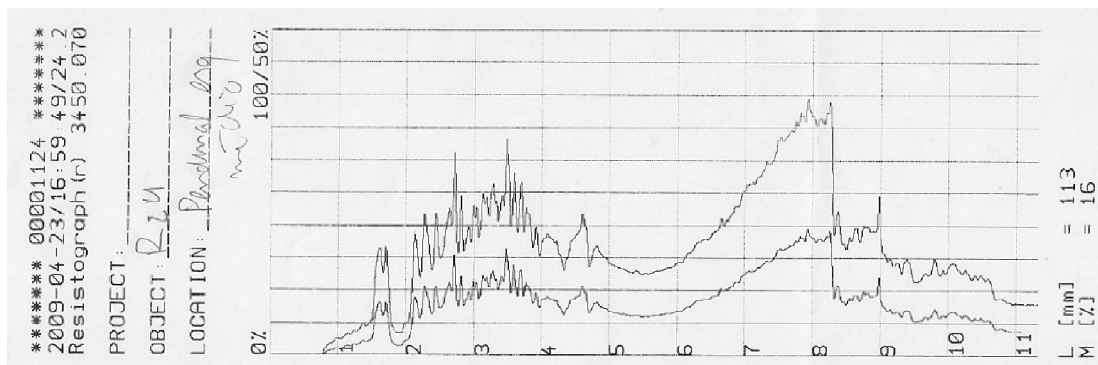


Figura B52 Resultado extraído directamente do Resistograph® (R24)